

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear



**EVALUACIÓN ENERGÉTICA EXPERIMENTAL DE
EDIFICIOS EN CONDICIONES REALES DE USO
MEDIANTE EL AJUSTE DE MODELOS DE
SIMULACIÓN CON APLICACIONES AL CONTROL
PREDICTIVO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR**

Ricardo Enríquez Miranda

Bajo la dirección de los doctores

**M^a José Jiménez Taboada
M^a del Rosario Heras Celemín**

Madrid, 2013



EVALUACIÓN ENERGÉTICA EXPERIMENTAL DE EDIFICIOS
EN CONDICIONES REALES DE USO MEDIANTE EL AJUSTE
DE MODELOS DE SIMULACIÓN CON APLICACIONES AL
CONTROL PREDICTIVO

Memoria para optar al Grado de Doctor.
Presentada por

RICARDO ENRÍQUEZ MIRANDA

Dirigida por:

M^a JOSÉ JIMÉNEZ TABOADA
M^a del ROSARIO HERAS CELEMÍN

Madrid, Diciembre de 2012

A mis padres Ventura y Carmen, por todo lo pasado

A mis hijos Arturo y Miguel, por hacerme sonreír al futuro

A Nuria, por cada instante

AGRADECIMIENTOS

Una tesis doctoral dista mucho de ser un trabajo individual. No sólo es el autor el que se doctora. Se doctoran con él todas sus circunstancias y decorados, a los que se deben agradecimiento.

Todas las personas que han aportado algo a mi trabajo durante estos años y los anteriores merecen mi agradecimiento.

Merecen especial atención mis directoras de tesis M^a del Rosario Heras Celemín y M^a José Jiménez Taboada por la confianza que han depositado en mi durante todo este tiempo y la libertad que siempre me han otorgado en el desarrollo de este trabajo de investigación. A Carlos Armenta Déu también quiero agradecerle todo el tiempo y la atención que me ha dedicado.

El autor debe, asimismo, agradecer los numerosos recursos que CIEMAT ha puesto a su disposición para la realización de este trabajo.

Muchos son los compañeros de la Unidad de Investigación sobre Eficiencia Energética en la Edificación, presentes, pasados y futuros. Cualquiera de ellos que lea estas líneas que se sienta agradecido. Agradecimiento especial merecen Silvia y Cristina, praderistas y remeras, puesto que pertenecen a la misma clasificación ontológica que el autor de esta memoria. Luis Zarzalejo también merece un lugar especial.

A todos mis buenos amigos, que siendo pocos animan como si de un millón se trataran.

A mis padres, Ventura y Carmen, a mis hermanos, José Luis y Natalia, y a mis cuñados, Trini y Andrés. A mi compañera en la vida, Nuria, que sin ella nada soy. Y a mis dos hijos, Arturo y Miguel, por todo lo que les he tenido que robar durante este tiempo.

Gracias a todos.

3.4.2. Sensores y sistema de adquisición de datos.....	61
3.4.3. Incertidumbre final asociada a las medidas.....	71
3.5. Conclusiones	72
4. Resultados preliminares.....	75
4.1. Introducción	77
4.2. Descripción de las series temporales empleadas	77
4.3. Análisis de la representatividad de los recintos escogidos.....	81
4.3.1. Análisis de la homogeneidad del cerramiento	81
4.3.2. Evaluación del confort térmico en el interior de los recintos...	83
4.3.3. Uso relativo a otras estancias: Análisis de componentes principales.....	93
4.4. Validación de la aproximación de temperatura a un nodo	102
4.5. validez del modelo empleado en la evaluación teórica.....	104
4.5. Conclusiones del capítulo.....	110
5. Diagnóstico del modelo original. Modificación y ajuste de un nuevo modelo.....	115
5.1. Caracterización de variables exógenas. Ajuste en evolución libre.....	116
5.1.1. Reflectancia hemisférica del terreno colindante al C-Ddl.....	116
5.1.1.1. Estimación del albedo mediante la aproximación de problema directo.....	121
5.1.1.2. Estimación del albedo mediante la aproximación de problema inverso.	124
5.1.1.3. La regularización de Tikhonov y el método de las L-curvas	129
5.1.2. Temperatura del terreno bajo el C-Ddl	131
5.1.3. Intercambio de onda larga en el edificio singular (C-Ddl)	137
5.1.4. Ajuste y diagnóstico mediante estimación de parámetros libres	142
5.1.4.1. Definición de una función objetivo.	142
5.1.4.2. Definición de ligaduras sobre el sistema	143
5.1.4.3. Selección del algoritmo de optimización: Evolución Diferencial.....	143
5.1.4.4. Diagnóstico del modelo original.....	145
5.1.4.5. Nuevo modelo a partir del diagnóstico	147
5.2. Caracterización de variables endógenas. Ajuste en condiciones reales de uso.....	153
5.2.1. Componentes activos: Distribución de calor a través del suelo radiante.....	154
5.2.2. Intercambios de aire: climatización a través de inductores e intercambios con otros recintos.....	155
5.2.3. Ganancias internas de calor	157

5.2.4. Ajustes del modelo para condiciones reales de uso: Consideraciones sobre la medida de la temperatura del vidrio	157
5.2.5. Ajustes del modelo para condiciones reales de uso: resultados.....	164
5.3. Generalización a otros despachos	179
5.4. Conclusiones del capítulo	186
6. Aplicaciones	191
6.1. Comprobación teórico-experimental.....	191
6.1.1. Solución de las ecuaciones del modelo a temperatura constante.....	192
6.1.2. Influencia de cada uno de los parámetros del modelo	193
6.1.3. Comparación con los datos experimentales.....	197
6.2. Desarrollo de un modelo de orden reducido y sus aplicaciones al control predictivo	199
6.2.1. Modelo de orden reducido para el C-Ddl	201
6.2.2. Identificación del modelo mediante simulaciones ajustadas ..	203
6.2.3. Empleo del modelo de orden reducido en control predictivo...	206
6.2.3.1. Función energética de coste mínimo.....	206
6.2.3.2. Solución de MPC mediante programación lineal.....	207
6.3. Otras aplicaciones	210
6.4. Conclusiones del capítulo.....	210
7. Conclusiones	215
8. Bibliografía.....	221

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo está incluido dentro de la línea de investigación que se lleva a cabo en la Unidad de Investigación sobre Eficiencia Energética en la Edificación de la División de Energías Renovables del CIEMAT.

Una de las principales actividades de este grupo, a lo largo de su trayectoria, ha consistido en el desarrollo y validación de modelos dinámicos para la evaluación energética tanto de componentes de la edificación como de edificios en su conjunto.

El presente trabajo titulado: "Evaluación energética de edificaciones en condiciones reales de uso mediante el ajuste de modelos de simulación con aplicaciones al control predictivo" es continuación de trabajos llevados a cabo en el grupo de investigación desde sus orígenes, en 1986, sobre evaluación energética de edificaciones en condiciones reales de uso.

La investigación que se detalla en esta memoria consta de las siguientes partes:

- Estudio del impacto medioambiental del consumo energético de los edificios en la sociedad actual, prestando especial atención a los aspectos relativos a la climatización de los mismos para llegar a obtener condiciones de confort térmico en su interior.
- Estudio teórico de los fundamentos físicos en los que se basan los modelos de simulación del comportamiento energético de las edificaciones en régimen dinámico, considerando como caso práctico el software de simulación TRNSYS.
- Descripción del Proyecto Singular Estratégico sobre Arquitectura Bioclimática y Frío Solar (PSE-ARFRISOL), en cuyo desarrollo, construcción y evaluación energética se encuadra la investigación que en esta Memoria se expone.
- Desarrollo de una metodología innovadora de diseño experimental, basada en el modelo de simulación, que permite la identificación unívoca de cada uno de los parámetros físicos implicados en la evolución temporal de la temperatura del aire interior de la edificación.
- Selección de uno de los edificios del PSE-ARFRISOL como caso práctico de aplicación de la metodología, concretamente el construido en la Plataforma Solar de Almería. En dicho edificio se procede a la selección e instalación de los sensores más adecuados para el estudio, atendiendo a la incertidumbre experimental a lo largo de toda la cadena de medida.

- Análisis de la influencia de la incertidumbre experimental sobre la identificación de los parámetros físicos implicados en la evolución temporal de la temperatura del aire interior del edificio bajo estudio.
- Desarrollo de métodos innovadores para la caracterización experimental de las variables exógenas asociadas al análisis energético de una edificación.
- Desarrollo e implementación de técnicas numéricas basadas en algoritmos genéticos y apropiadas para la estimación de los parámetros físicos que rigen la evolución temporal de la temperatura del aire interior de un edificio.
- Desarrollo de una metodología de diagnóstico e identificación de parámetros de los modelos que permite caracterizar unívocamente la respuesta de la temperatura del aire interior a las excitaciones producidas por las variables exógenas durante la evolución libre de la edificación.
- Aplicación de la metodología anterior al estudio de la evolución temporal de la temperatura del aire interior durante los periodos en los que el edificio se encuentra ocupado y climatizado. Empleo de medidas adicionales como la concentración de CO₂ en el aire interior como indicadores de la idoneidad del método empleado.
- Desarrollo del marco matemático apropiado que permite la utilización de un modelo ajustado mediante la anterior metodología en el marco del control predictivo.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS DE LA EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS

2.1. INTRODUCCIÓN.

En la actualidad el software de simulación térmica de edificaciones ha alcanzado una posición de confianza entre los profesionales de la arquitectura y la ingeniería. Tanto es así que muchos Códigos Técnicos de la Edificación de diferentes países, entre los que se encuentra España, obligan a la realización de simulaciones de la dinámica térmica de los edificios durante la fase de diseño. Si los resultados de las simulaciones no son lo suficientemente adecuados dentro de un marco de ahorro y eficiencia energética el edificio ha de ser rediseñado hasta que cumpla con unos mínimos requerimientos exigidos. Este hecho confirma que la comunidad de arquitectos e ingenieros deposita un elevado grado de confianza en dichos códigos.

Es natural, por tanto, preguntarse si ese tipo de software de simulación es capaz de ajustarse a las condiciones reales de uso. La confianza en dichos códigos unido a que la física básica de la transferencia de calor y de masa se conoce con un grado de precisión bastante exhaustivo sugieren que así debe ser. No obstante, estos hechos deben comprobarse científicamente. Un hecho similar ocurre en el campo de la Astrofísica: aunque la comunidad científica internacional estaba convencida de la existencia de exoplanetas, no fue hasta el 6 de octubre de 1995 que pudo afirmarse positivamente su existencia con el descubrimiento de 51 Pegasi b, conocido popularmente como Belerofonte (Mayor y Queloz, 1995).

En caso de que se demostrase positivamente – o se acotase el rango de aplicación exacto - la validez de los códigos se habrían dado pasos importantes hacia una calificación energética empírica de las edificaciones, tal y como prescribe la Directiva Europea sobre Eficiencia Energética en las Edificaciones de 2010 (DE4, 2010) y para la que se ha creado el Annex 58 del Acuerdo de Implementación sobre Conservación de la Energía en Edificios y Servicios Comunitarios (Energy Conservation in Buildings and Community Services, ECBCS) de la Agencia Internacional de la Energía (International Energy Agency, IEA) (Annex 58, 2012).

Es más, si se dispone de un modelo lo suficientemente adecuado para la caracterización de la evolución temporal de la temperatura del aire interior de un edificio es lícito preguntarse si ese conocimiento puede emplearse de una forma predictiva para optimizar el funcionamiento de las edificaciones. Esta cuestión reviste un particular interés, dado que la consolidación y desarrollo de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones puede aportar importantes avances en la gestión energética de las edificaciones.

En esta Memoria, titulada **Evaluación energética experimental de edificios en condiciones reales de uso mediante ajuste de modelos de simulación con aplicaciones al control predictivo**, se examina la posibilidad de predecir la temperatura del aire interior de una edificación a través del ajuste de modelos de simulación dinámicos basados en primeros principios de la física y las posibilidades que esto ofrece dentro del control predictivo.

La Memoria se ha estructurado en ocho capítulos. En el primero de ellos, la introducción, se contextualiza la línea de investigación que da lugar a esta investigación. En el segundo se enmarca el problema de la evaluación energética de las edificaciones desde una perspectiva científica y se precisan las definiciones relativas a la validez de un modelo. En el tercero se

describe en detalle el objeto de estudio, el diseño experimental realizado y las características principales del sistema de medida implementado. El cuarto capítulo se dedica a los análisis preliminares de los datos experimentales obtenidos, enfocándose principalmente en la comprobación del cumplimiento de las hipótesis bajo las que el experimento ha sido diseñado. En el capítulo quinto se desarrolla la metodología para el ajuste del modelo de simulación teórico a la situación real en condiciones de uso y se procede al ajuste en el caso de estudio, prestando especial atención a los diferentes ámbitos de aplicación de un modelo ajustado según esta metodología desarrollada y presentada. En el sexto capítulo se presentan algunas aplicaciones de un modelo ajustado según esta metodología, centrándose principalmente en dos: la evaluación experimental del modelo teórico y el desarrollo de modelos de orden reducido para aplicaciones en el control predictivo de edificaciones en condiciones reales de uso. El capítulo séptimo presenta las conclusiones del trabajo de una forma ordenada y sistemática y el último de los capítulos, el 8, resume las referencias empleadas en el estudio. En este capítulo, el 2, se enmarca científicamente la evaluación energética de las edificaciones. En primer lugar se realiza una descripción de la importancia del consumo energético en las edificaciones dentro del contexto del gasto energético global, con el objetivo de valorar el impacto global que pueden suponer estas medidas. Acto seguido se realiza una revisión de los fenómenos físicos implicados en la dinámica térmica de las edificaciones, enfocándose en los modelos de edificios como “teorías efectivas” derivadas de las leyes físicas básicas de la transferencia de calor y masa y. En ese contexto se analizan la evolución de los diferentes tipos de modelos empleados para la evaluación energética de edificaciones, así como los esfuerzos empleados en su verificación. Acto seguido se describirá el modelo escogido para el estudio y finalmente se hará una descripción del Proyecto Singular Estratégico sobre Arquitectura Bioclimática y Frío Solar PSE-ARFRISOL, en el que se encuadra esta investigación. Como se describirá con más detalle posteriormente, el proyecto PSE-ARFRISOL es un Proyecto de Investigación Singular y Estratégico subvencionado inicialmente por el Ministerio de Educación y Ciencia (MEC) y después por el Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN) en la convocatoria de 2005 y hasta 2011 del Plan Nacional de Investigación y Desarrollo y financiado con fondos FEDER.

2.2. EDIFICACIÓN Y ENERGÍA.

El ámbito energético en la edificación se puede entender desde dos perspectivas principalmente. En primer lugar, y desde una perspectiva más medioambiental, se puede entender como el impacto que tienen las edificaciones sobre el cambio climático, el agotamiento de los recursos naturales u otros aspectos medioambientales. En segundo lugar, se puede entender desde aspectos relativos a la física básica, como es la cantidad que se conserva en el primer principio de la termodinámica. En las siguientes secciones se aborda cada uno de estos aspectos.

2.2.1. EDIFICACIÓN Y ENERGÍA. CONTEXTO MEDIOAMBIENTAL.

Un referente internacional en el contexto del consumo energético es la Agencia Internacional de la Energía (IEA, www.iea.org). Entre sus numerosas publicaciones, una de las más influyentes es la Revisión Energética Mundial (World Energy Outlook, WEO) que publica cada año. En estas publicaciones se analiza el estado energético mundial desde diferentes perspectivas: por regiones, por fuentes de energía primaria, por demanda, etc. Y se definen varios escenarios mundiales que permiten pronosticar las tendencias energéticas mundiales con el objetivo de que los diferentes dirigentes políticos puedan tomar decisiones más informadas.

En este sentido la edición de 2010 (WEO, 2010) presenta tres escenarios diferenciados. En el *escenario de nuevas políticas* (Current Policies Scenario) se incluyen todas las políticas energéticas y medioambientales anunciadas por los países, incluso aunque aún no se hayan implementado. En el *escenario de políticas existentes* (New Policies Scenario) se asume que no se realizan cambios en la política energética y medioambiental más allá de la existente a mediados de 2010. Finalmente, el *escenario 450* (450 Scenario), implementa un conjunto de políticas consistente con el objetivo de limitar el incremento en la temperatura global del planeta a dos grados Celsius fijado en la cumbre de Naciones Unidas en diciembre de 2009. La figura 2.1. muestra el pronóstico de la demanda de energía mundial hasta 2035 en cada uno de los escenarios descritos. **La demanda energética mundial aumenta progresivamente hasta 2035 en todos los escenarios**, aunque la tasa de aumento es menor en los escenarios en los que las políticas energéticas y medioambientales son más favorables.

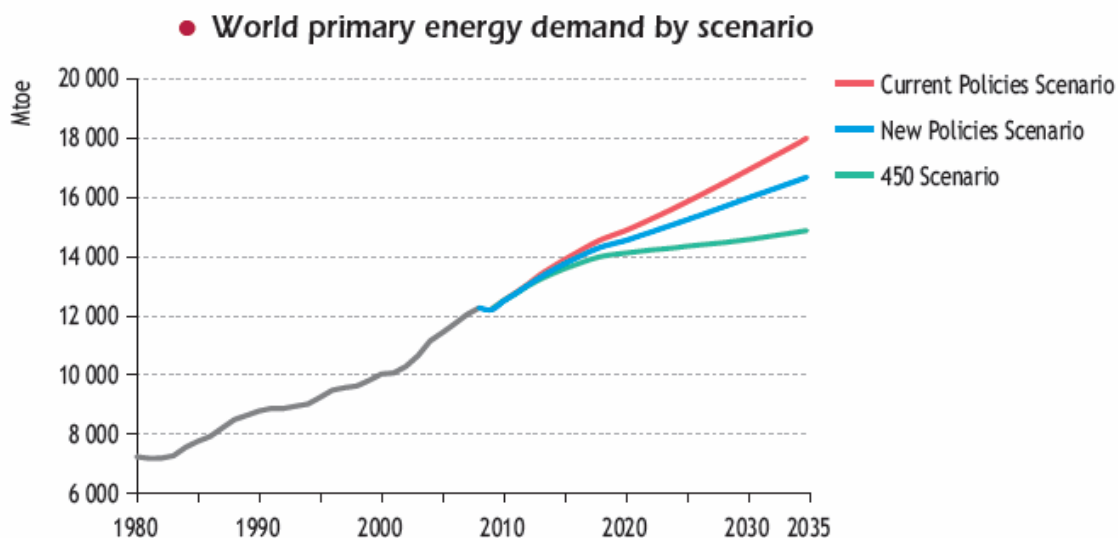


Figura 2.1. Demanda mundial de energía hasta 2035. Pronóstico para diferentes escenarios. Fuente: WEO 2010, IEA.

Junto a la proyección de la demanda de energía mundial hasta el 2035 se analiza la distribución relativa (share) de las fuentes de energía primaria empleadas para satisfacer esta demanda. El resultado se muestra en la figura 2.2.

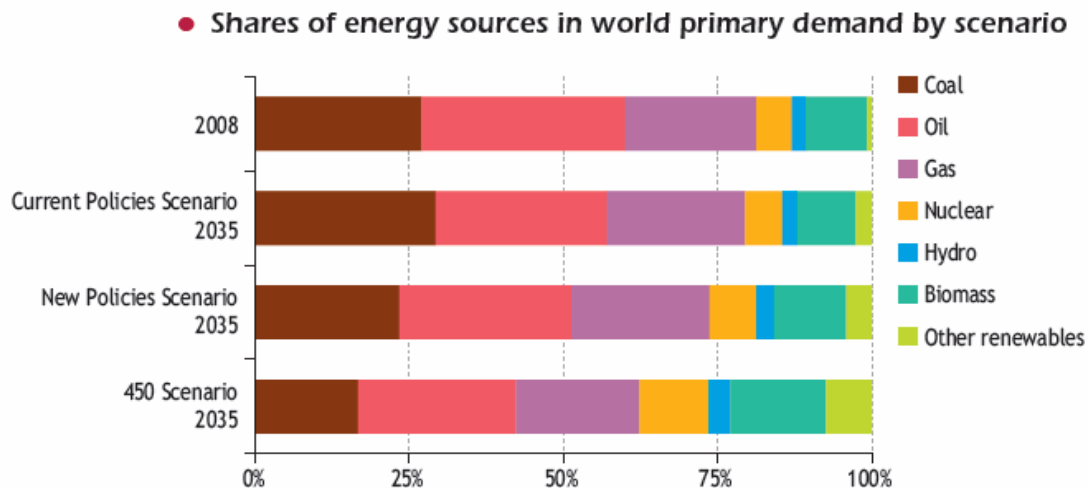


Figura 2.2. Distribución relativa de las fuentes de energía primaria en 2035. Pronóstico para diferentes escenarios. Fuente: WEO 2010, IEA.

Se puede observar que en todos los escenarios analizados **en 2035 los combustibles fósiles** (carbón, petróleo y gas natural) **siguen dominando como fuentes primarias de energía a nivel mundial**. No obstante, se reduce su porcentaje relativo con respecto a los niveles de 2008, aumentando los porcentajes de nuclear, de biomasa y de otras fuentes de energía renovable que incluye, entre otras, a la energía solar y la energía eólica. El pronóstico para la distribución relativa de cada una de ellas depende del escenario analizado.

Asimismo, como se puede comprobar en la figura 2.3, en el escenario de nuevas políticas la distribución relativa de la demanda energética mundial por regiones es asimétrica. Aunque la demanda energética de los Estados Unidos y Europa permanece prácticamente constante, la de China y la India aumentan notablemente, marcando a China como el mayor consumidor energético mundial.

Cabe ahora preguntarse la distribución por sectores de dicha demanda de energía. No obstante, la información a escala mundial presenta mucha dispersión, reflejando las desigualdades existentes entre las diferentes naciones del planeta. Por ello, el análisis ahora se localiza para España, tomando los datos de las publicaciones del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).

De los análisis realizados **para el ejercicio de 2008** se comprueba que en España las fuentes de energía primaria son principalmente combustibles fósiles, como se muestra en la figura 2.4. De hecho, **más del 80% de la demanda energética española se cubrió mediante combustibles fósiles**, dentro de la tendencia mundial analizada por la IEA en el WEO, por lo

que con la aplicación de las políticas del escenario 450 del WEO podría reducirse la demanda de combustibles fósiles en España hasta un 65% en 2035. Concretamente, las fuentes de energía primaria renovable supusieron un 7.64 % del total, con más de la mitad de ellas en concepto de Biomasa y Residuo Sólido Urbano. La energía solar supuso un 0.25 %.

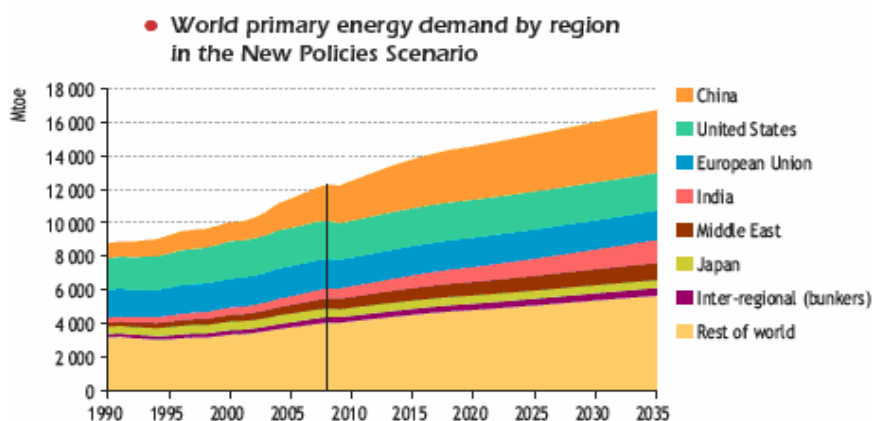


Figura 2.3. Distribución relativa de la demanda energética por regiones en 2035. Pronóstico en el escenario de nuevas políticas. Fuente: WEO 2010, IEA.

Para analizar el consumo energético por sectores, en primer lugar hay que excluir los usos no energéticos. Los datos así analizados para 2008 y presentados en la figura 2.5 revelan que el sector del mayor demanda energética fue el del transporte, con aproximadamente un 40% del total. El resto se lo dividen, a partes prácticamente iguales, el sector industrial (30.4 %) y el de edificación y terciario (29.5 %).

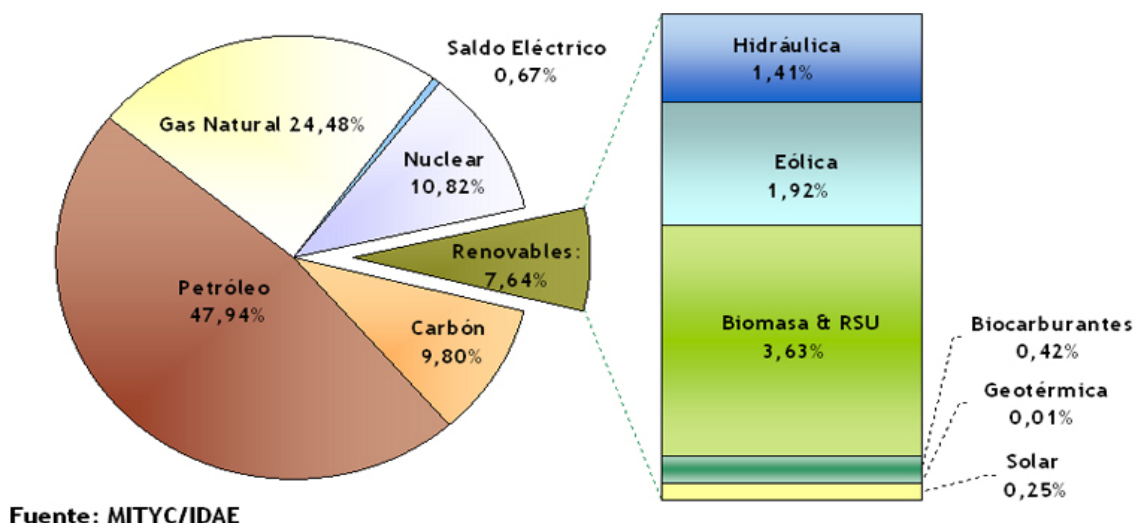
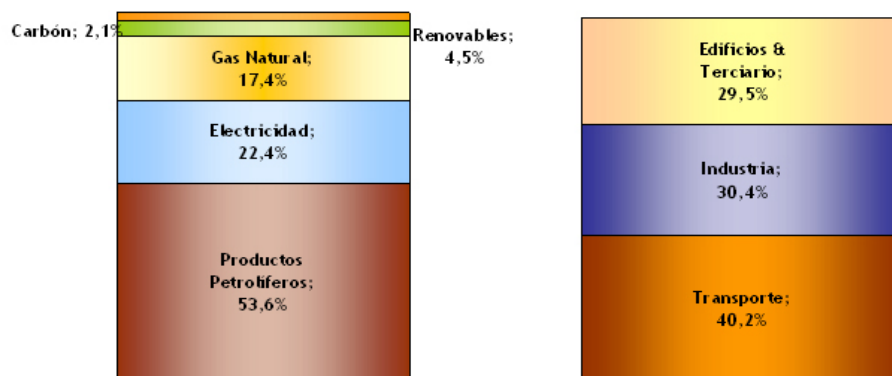


Figura 2.4. Estructura de las fuentes de energía primaria empleadas en España en el ejercicio 2008.

Así, se puede concluir que cerca de **un tercio del consumo energético total de España se produce en el ámbito de la edificación**. Las energías renovables, por su parte, alcanzan el

4,5% de la cobertura a la demanda de energía final, lo que equivale al doble de la aportación del carbón. Según los análisis de los expertos del IDAE, este hecho se debe principalmente a dos factores: las demandas de biocarburantes en el sector transporte en primer lugar y de energía solar térmica, básicamente en el sector edificios en segundo lugar.



Fuente: MITYC/IDAE
Nota: Usos No Energéticos Excluidos

Figura 2.5. Consumo energético en España en el ejercicio 2008 por fuentes y sectores, una vez excluidos los usos no energéticos.

En lo que se refiere al **sector residencial, el consumo de este sector equivale al 16,7% del consumo final total**. Se observa en este sector una disminución en el consumo de los productos petrolíferos y sobre todo del carbón, cuya demanda en este sector va disminuyendo progresivamente a favor de otros combustibles, como las energías renovables y el gas natural, registrando este último un aumento del 10,6% en su demanda en 2008. En el caso de las energías renovables, cabe destacar su penetración en este sector, alcanzando el 13% de la contribución a la demanda del mismo. La figura 2.6 muestra la distribución del consumo energético por usos en el sector residencial para España y la UE27.

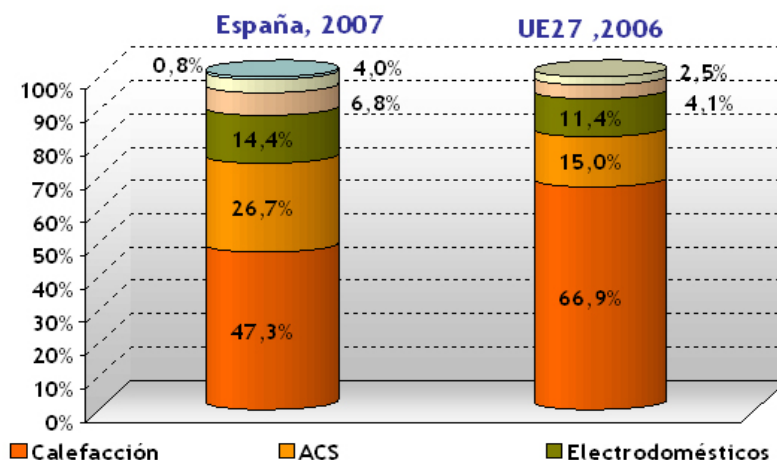


Figura 2.6. Distribución del consumo energético por usos en el sector residencial en España y la UE27.

Fuente: IDAE.

La distribución del consumo energético por usos en 2008, considerando la distribución del consumo energético por usos según la información disponible, muestra al **consumo asociado a calefacción de las viviendas (47,3%) como el mayor demandante de energía**. Este dato contrasta el 67% de cuota que este uso registra en la media europea, lo cual se explica en buena parte por la benevolencia de nuestro clima en invierno. **Se espera, sin embargo, que en lo sucesivo aumente el consumo de la calefacción**, principalmente **como consecuencia de la tendencia a un mejor equipamiento así como a la progresiva penetración de los sistemas individuales de calefacción**, en general menos eficientes que los sistemas colectivos.

Con respecto al **sector servicios**, el consumo energético en el año 2008 registró una cifra equivalente al **9,3% del consumo final total**. Prácticamente todas las fuentes energéticas, a excepción de las energías renovables y de la electricidad, registraron una disminución en su demanda, siendo más significativo en el caso del carbón y del gas natural. **La demanda eléctrica en el sector terciario, por su parte, representa el 67,6% del consumo total de este sector, principalmente empleada en los conceptos de climatización e iluminación**.

Con relación a los distintos subsectores que integra el sector servicios, se observa una cierta estabilización en el consumo a lo largo de los últimos años, siendo **los edificios ligados a las oficinas y al comercio, responsables de casi el 80% del consumo total del sector**, así como de la mayor parte de la demanda eléctrica del sector. La figura 2.7 representa gráficamente este hecho.

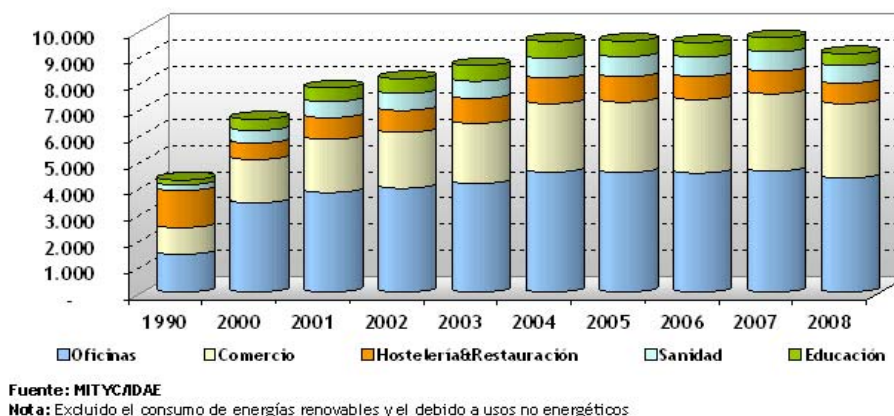


Figura 2.7. Evolución del consumo energético del sector servicios en España, 1990-2008

Así, se puede concluir que la demanda energética va a aumentar en las próximas dos décadas y se mantendrán los combustibles fósiles como fuentes de energía primaria dominantes al final del periodo, aunque en menor porcentaje relativo. **Aproximadamente un tercio de la demanda de energía global se destina al sector de la edificación y más de la mitad de ésta al acondicionamiento térmico de su interior**.

Así, uno de los aspectos fundamentales a analizar es la transferencia de calor en edificaciones. La siguiente sección introduce los principios físicos relativos a la transferencia del calor.

2.2.2. FÍSICA ENERGÉTICA DE LAS EDIFICACIONES.

Se puede definir un edificio como un sistema termodinámico abierto y no adiabático que intercambia masa y energía con su entorno. Se puede ver como el ensamblaje de una serie de elementos sólidos (muros, puertas, ventanas, etc.) que separan un volumen de aire del entorno exterior. Los principales procesos físicos que contribuyen a la definición del estado térmico de una edificación son:

- Conducción del calor a través de los elementos sólidos;
- Intercambios de radiación de onda larga entre las superficies interiores, y entre las superficies exteriores y el entorno;
- Transmisión y Absorción de la radiación solar;
- Transferencia de calor convectiva en las interfases aire-superficie; y
- Transferencia de calor convectiva por transporte de masas de aire entre las diferentes zonas de un edificio, y entre cada zona y el entorno que lo rodea.

Los principios básicos de la transferencia de calor se pueden encontrar en cualquier libro de texto de física. En esta sección se hace una descripción de los mismos de una forma general, dejando para más adelante la aplicación concreta de los mismos para la construcción de un modelo que explique los aspectos térmicos que se dan en una edificación de manera dinámica. La transferencia de calor es el resultado de una interacción energética entre un sistema termodinámico y su exterior, que se produce a través de su frontera debido a una diferencia de temperatura. Como interacción energética su unidad de medida es el Joule (J) y tiene dimensiones fundamentales $[M L^2 T^{-2}]$. Ningún instrumento puede medir directamente la transferencia de calor, por lo que se obtiene como magnitud derivada de otras medidas.

La transferencia de calor se produce de tres formas: conducción, radiación y convección. La conducción es la transferencia de calor asociada con la energía interna de una sustancia y que ocurre en su interior sin movimiento macroscópico de sus partes. Por ello, no existe conducción en el vacío. La radiación es el modo de transferencia de calor asociado con las ondas electromagnéticas y, por tanto, se puede presentar en el vacío. La convección es un tipo de transferencia de calor que se da en los fluidos y que combina aspectos de la conducción y de los movimientos del fluido.

2.2.2.1. CONDUCCIÓN

La ecuación constitutiva de la ecuación del calor está directamente relacionada con el gradiente de temperatura y debe ser consistente tanto con el segundo principio de la termodinámica (el intercambio de calor debe producirse entre sistemas a diferente temperatura) como con el primero (la energía debe conservarse en ausencia de fuentes o sumideros de la misma). En general, la temperatura se define como un campo escalar dependiente de la posición y del tiempo. Con estas características, el flujo de calor, q , se define como:

$$q = -k \nabla T, \text{ (ec. 2.1)}$$

Donde k es una propiedad física de cada sustancia denominada conductividad térmica y que se puede relacionar directamente con su comportamiento microscópico. A la relación anterior se le denomina relación de Fourier y, junto al primer principio de la termodinámica, es la base para la denominada ecuación del calor:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q_g, \text{ (ec. 2.2.)}$$

Donde q_g es el calor generado por unidad de tiempo y de volumen, ρ su densidad y c la capacidad calorífica. Esta ley es válida, en general, para medios isótropos y heterogéneos. Esta ecuación ha sido verificada experimentalmente para un amplio rango de temperaturas, formulándose correcciones a la misma a temperaturas ultrabajas como la del Helio II líquido (por debajo de 2.2 K) donde los efectos cuánticos no resultan despreciables. Esta corrección convierte la ecuación del calor de su forma parabólica a la hiperbólica. No obstante, en el rango de temperaturas que resultan de aplicación de la edificación estos efectos pueden considerarse nulos.

2.2.2.2. RADIACIÓN

La radiación térmica es la transferencia de energía en forma de ondas electromagnéticas. El mecanismo microscópico se puede relacionar con el transporte de energía en la forma de fotones emitidos por átomos y moléculas. Los parámetros físicos que describen la radiación térmica son su velocidad de propagación (c), su longitud de onda (λ) y su frecuencia (ν), verificándose:

$$\lambda \nu = c, \text{ (ec. 2.3)}$$

Por otra, parte, la velocidad de propagación de la radiación térmica en el vacío es igual a la velocidad de la luz en el vacío y en un medio determinado se relaciona con su índice de refracción, n :

$$n = c_0/c, \text{ (ec. 2.4)}$$

Las ondas electromagnéticas se clasifican por su longitud de onda, que se mide habitualmente en micrómetros (μm). La luz visible se encuentra en el rango de 0.4 a 0.7 μm y las ondas electromagnéticas generadas por cuerpos calientes en el rango de 0.3 a 10 μm y son las radiaciones térmicas de interés en el ámbito de la edificación. Todo cuerpo emite radiación térmica en función de su temperatura y el flujo de energía por unidad de superficie radiante es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta de su superficie (T), según expresa la ley de Stefan-Boltzman:

$$\varphi_{rad} = \varepsilon \sigma T^4, \text{ (ec. 2.5)}$$

Donde φ_{rad} es la tasa de emisión de de energía radiante por unidad de área, σ la constante de Stefan-Boltzman ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$) y ε es la denominada emitancia hemisférica. Ésta última depende de la sustancia, de la temperatura de la superficie y de la longitud de onda y toma valores en el rango $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Se denomina cuerpo negro a aquella sustancia con $\varepsilon = 1$ y en caso contrario se denomina cuerpo gris.

La distribución espectral de la radiación de un cuerpo negro fue deducida por Planck basándose en la teoría cuántica y expresada mediante la denominada distribución de Planck:

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c_0^2 \left[e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \right]}, \text{ (ec. 2.6)}$$

Donde h es la constante de Planck ($6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$) y k la constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$). De hecho, la ley de Stefan-Boltzmann es el resultado de la integral para todas las frecuencias de la ley de Planck .

Los cuerpos no sólo emiten radiación térmica, también reaccionan ante ella cuando incide sobre éstos. Cuando la radiación incide sobre un cuerpo, parte de esta es reflejada, parte transmitida y parte absorbida. Para describir estos fenómenos se definen la reflectancia (ρ) como el cociente entre el flujo reflejado y el flujo incidente, la absorptancia (α) como el cociente entre el flujo radiante o luminoso y el flujo incidente y la transmitancia (τ) como el cociente entre el flujo radiante transmitido y el flujo incidente. Estas cantidades cumplen la relación:

$$\rho + \alpha + \tau = 1. \text{ (ec. 2.7)}$$

Es conveniente destacar en este punto que estas cantidades dependen tanto de la longitud de onda como de la temperatura.

Para evaluar el intercambio radiativo entre dos cuerpos negros se debe emplear, además, el denominado factor de forma, que se define como la fracción de radiación interceptada por uno de los cuerpos con respecto al total de la radiación emitida por el otro. Se trata de una cantidad que se calcula a partir de premisas puramente geométricas y para las geometrías más comunes se puede encontrar en los libros de texto de transferencia de calor (Incropera, 1999).

2.2.2.3. CONVECCIÓN

La convección es un fenómeno que sucede principalmente en la frontera del flujo de un fluido con una superficie sólida. Se puede considerar que la temperatura del fluido a gran distancia del sólido es constante y que el gradiente de temperatura se concentra en una capa relativamente estrecha del fluido próxima al sólido, δ . En el caso simplificado de una variación lineal de temperatura a través de dicha capa se puede escribir:

$$Q = \frac{k_f A (T_f - T_s)}{\delta} = h (T_f - T_s), \text{ (ec.2.8)}$$

Con T_f la temperatura del fluido, T_s la del sólido, k_f la conductividad térmica del fluido y h el denominado coeficiente de convección. El coeficiente de convección no es una propiedad del fluido, depende de las condiciones dinámicas del flujo. Es importante emplear este coeficiente en las condiciones de contorno de los problemas de transferencia de calor conductivos. Las condiciones dinámicas del flujo quedan descritas por las ecuaciones de Navier-Stokes, cuya resolución analítica o numérica resulta una tarea compleja desde el punto de vista matemático y cuyas soluciones son muy sensibles a parámetros locales difíciles de conocer. Tanto es así que el Instituto Clay para las matemáticas (Clay, 2012) ha considerado algunas de las soluciones de estas ecuaciones uno de los problemas del milenio, junto a otros destacados como la demostración de la hipótesis de Riemann.

Existen relaciones en la literatura para estimar el coeficiente de convección en función de características propias de cada configuración, como la conductividad térmica del fluido, velocidad de corriente libre de fluido, densidad, viscosidad, calor específico a presión constante, coeficiente de dilatación, diferencia de temperatura entre la superficie y la corriente libre y la longitud de la superficie L . Estas relaciones empíricas, dependerán del tipo de intercambio (natural, forzado, mixto), del tipo de movimiento de aire (natural o turbulento) y de la configuración superficial del sólido considerado. Una descripción exhaustiva se puede

encontrar en los textos clásicos de transferencia de calor (Incropera, 1999; Chapman, 1981), por lo que no se mencionan en este punto.

Es conveniente, asimismo, destacar en este punto que dada la cantidad de componentes e interacciones entre ellos la solución analítica de la transferencia de calor se hace inviable. De hecho, dado que la transferencia de calor en una edificación presenta condiciones de contorno muy peculiares incluso las soluciones analíticas aproximadas se vuelven alejadas de la realidad. Por ello, se debe proceder al desarrollo de esquemas numéricos para la resolución del problema.

En la siguiente sección se aplican estos conceptos generales al caso concreto de la edificación, con el objetivo de obtener un modelo térmico dinámico y numérico de la misma.

2.2.3. MODELOS TÉRMICOS DE EDIFICACIONES.

Un modelo térmico de una edificación es una formulación matemática que permite el cálculo de las magnitudes energéticas de interés a partir de aproximaciones numéricas de los fenómenos físicos involucrados. Atendiendo a las **hipótesis sobre el comportamiento temporal de la edificación** los modelos se pueden clasificar en estudio de los fenómenos de una manera **estacionaria y dinámica**. En función de la **representación matemática escogida** se pueden clasificar en modelos en **espacio de estados** o en **función de transferencia**. En función de la **cantidad de ecuaciones** que se implementan en su formulación matemática se dicen **modelos de alto orden y de bajo orden**. Finalmente, se pueden clasificar en **empíricos** si se han construido a partir de datos experimentales o en **teóricos** si se han desarrollado a partir de principios de la física. Esta última clasificación, no obstante, es ciertamente difusa pues en la actualidad no hay ningún modelo bajo uso que no haya sido comparado experimentalmente de una u otra manera, aunque su rango de validez no sea universal.

En el trabajo de investigación que se presenta en este documento se adopta un modelo donde se estudian los fenómenos dinámicos de alto orden formulado en espacio de estados y desarrollado a partir de aproximaciones basadas en principios de transferencia de calor. La implementación de dicho modelo, además, parte de desarrollos previos de la comunidad científica con lo que se asegura un determinado grado de fiabilidad. La aproximación numérica concreta se aborda en la siguiente sección.

2.2.3.1. MODELOS EN ESPACIO DE ESTADOS

Como se ha mencionado al principio de la sección, un modelo térmico de una edificación debe resolver la transferencia de calor entre los diferentes elementos sólidos y el aire. En general, la temperatura es un campo escalar dependiente tanto de la posición como del tiempo. A falta de una solución analítica para cada caso, una de las maneras más convenientes de resolver el sistema consiste en discretizar el campo espacialmente y evaluar la temperatura en cada uno

de los puntos, lo que convierte un modelo con infinitos grados de libertad en uno con un número finito de ellos. Así, se pueden escribir de la forma general:

$$\begin{aligned}\dot{T}(t) &= F(T(t), U(t), \theta) \\ Y(t) &= G(T(t), U(t), \theta), \text{ (ec. 2.9)}\end{aligned}$$

Donde $T(t)$ es un vector n-dimensional que contiene las denominadas variables del espacio de estados (de forma muy habitual, aunque no exclusiva, las temperaturas en los nodos de una red de discretización), $Y(t)$ es un vector q-dimensional que contiene las observaciones o salidas del modelo y $U(t)$ es el vector que contiene las excitaciones al sistema. θ es un vector p-dimensional que contiene los parámetros del modelo, y F y G son dos matrices de funciones no lineales y dependientes del tiempo. Esta última definición se puede ampliar para sustituir funciones por algoritmos de índole más general, aunque en la mayoría de los casos, para los sistemas bajo estudio, es suficiente una definición matricial del problema. Entonces, un modelo particular corresponderá a una realización concreta de las matrices F , G y del vector θ .

En función de la dimensión de las matrices se habla del orden del modelo. Aunque no hay una clasificación numérica precisa, se dice que para valores de dichas dimensiones inferiores a 5 ó 6 se presentan modelos de bajo orden y para dimensiones del orden de las decenas o las centenas se presentan modelos de alto orden.

La ventaja de estos modelos es que permiten una construcción a partir de los principios de la Física, por ejemplo, a partir de parámetros acoplados lineales en el caso de la conducción (Jiménez, 2008; Madsen, 1995). En este tipo de construcciones de los modelos es donde se basa el hecho de que la ecuación matemática a resolver es la misma en diferentes áreas de la física como son la termodinámica y el electromagnetismo. Así, bajo determinadas hipótesis un cálculo de la transferencia de calor a través de un elemento sólido puede equivaler al cálculo de la intensidad en un determinado circuito eléctrico compuesto de resistencias, condensadores y fuentes de alimentación. Se tiene la ventaja adicional de que todos los parámetros introducidos en el modelo tienen una interpretación física directa.

No obstante, los modelos creados de esta manera no son únicos, y se ha de prestar especial atención a la construcción de los mismos antes de obtener conclusiones. La siguiente sección aborda este aspecto.

2.2.3.2. UNICIDAD DE LOS MODELOS: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Como se ha comentado, una manera de construir los modelos en espacio de estados es considerar la analogía matemática que existe entre algunos procesos de transferencia de calor y el cálculo de circuitos eléctricos. Este hecho permite explicar de una forma sencilla la ausencia de unicidad de los modelos de espacio de estados. La figura 1.8 ilustra un conocido resultado en teoría de circuitos: la transformación delta-estrella. Para una determinada relación

entre las resistencias de los circuitos de la izquierda y de la derecha las diferencias de potencial medidas en los puntos a, b y c son idénticas. Este hecho, en el caso de la transferencia de calor, indica que no se puede distinguir físicamente entre estructuras de modelos determinadas y que no se puede asegurar que uno sea mejor que otro.

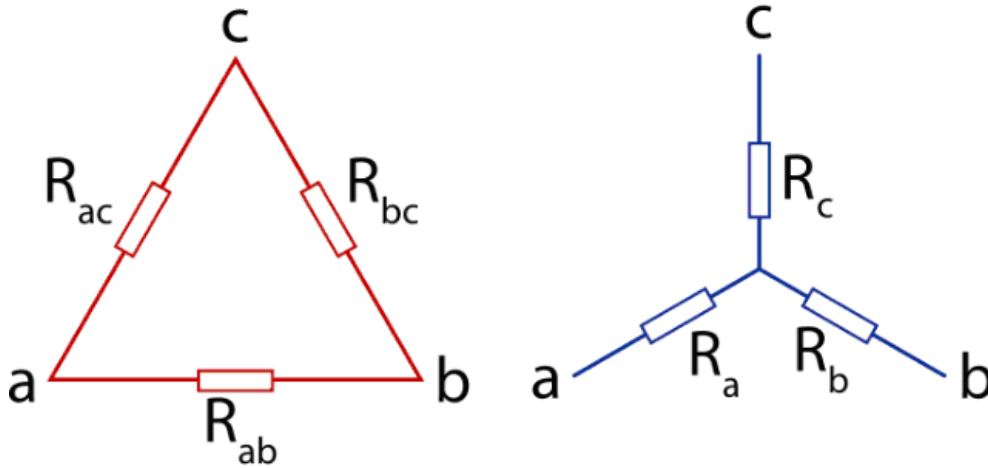


Figura 1.8. Transformación delta-estrella entre circuitos.

Matemáticamente, se puede resolver este hecho tomando la transformada de Laplace al modelo en espacio de estados, resultando una forma denominada de función de transferencia, que se puede expresar como:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} \equiv H(s), \text{ (ec 2.10)}$$

Donde $Y(s)$ y $U(s)$ son las transformadas de Laplace de la salida y la entrada, respectivamente, y $H(s)$ es la denominada función de transferencia que está definida estrictamente para sistemas lineales. En el caso de tiempo discreto, la variable compleja s se puede sustituir por el operador de retardo z^{-1} , derivando de este modo los modelos recursivos tipo ARMAX.

Un resultado matemático interesante es que **la función de transferencia es única para cada sistema, mientras que el modelo en espacio de estados no lo es**. Así las identificaciones de modelos es preferible hacerlas en función de transferencia. Los modelos en función de transferencia presentan, a su vez, otros problemas como por ejemplo que introducen parámetros de difícil interpretación física. La transformación inversa de función de transferencia a espacio de estados no es trivial y habitualmente se escogen representaciones canónicas basadas en las propiedades del control y de la observación. El método de identificación de parámetros térmicos basado en modelos en función de transferencia ha sido empleado en el pasado (Porcar, 2008; Jiménez, 2009) en el ámbito de las edificaciones y de los componentes de la edificación. Aunque el método aplicado estima algunos de los parámetros térmicos dentro del rango de validez física, se reconocen problemas derivados de la estimación del orden del

modelo y, por consiguiente, de la estructura física del modelo en el espacio de estados. De hecho, en dichos trabajos aparecen parámetros que no son interpretables físicamente y aparecen cuestiones relativas a la estabilidad de los modelos estimados en función de transferencia que no se resuelven de forma satisfactoria. De hecho, la estimación de estructuras de modelo adecuadas para la representación de la dinámica de edificaciones es aún motivo de investigación (Bacher, 2011).

Por otra parte, cada vez es más común el empleo de códigos de simulación para el cálculo de la evolución temporal de la temperatura interior de las edificaciones, en donde ya se han realizado aproximaciones numéricas a los fenómenos físicos implicados en la transferencia de calor en las edificaciones.

Por ello, en este trabajo **se opta por un modelo en espacio de estados, resolviendo la unicidad de la representación a través de aproximaciones comunes en el ámbito de la comunidad científica dedicada a la evaluación energética de las edificaciones**. Dicha aproximación consiste en los códigos de simulación para la evaluación energética dinámica de edificios, cada vez de mayor aplicación en el ámbito de la edificación.

2.2.3.3. VALIDACIÓN DE MODELOS TÉRMICOS DE EDIFICACIONES.

Hace décadas que se emplean entornos de modelización y códigos de simulación para el análisis de la dinámica térmica de edificaciones. Numerosos programas de simulación han sido comprobados de una u otra manera y no resulta extraño que sus autores reclamen que han “validado” su software. El término “validación” se ha empleado con múltiples significados en el pasado. Muy a menudo se emplea en el sentido de que se ha comprobado de una vez por todas la precisión absoluta de un programa. No obstante, el comportamiento térmico de una edificación depende de una ingente cantidad de parámetros. Ante esa situación resulta del todo imposible comprobar todas las combinaciones posibles de dichos parámetros para asegurar que la aproximación es correcta. Incluso si el comportamiento verdadero del edificio se conociera con precisión arbitraria.

Aunque no es posible validar un modelo o un código de simulación para todos los tipos de aproximaciones posibles, ejercicios de validación desempeñados con rigor incrementan la confianza depositada en ellos. Además, los ejercicios de validación desempeñan un doble papel : en primer lugar, como ayuda a la modelización, ayudando a escoger las estructuras de modelos más efectivas y los valores numéricos precisos que emplear. En segundo lugar, como una ayuda hacia la reutilización de modelos, simplificando así el acceso al conocimiento a terceros.

Los diferentes elementos que componen un programa de validación son los siguientes (Jensen, 1993):

- Revisión de la teoría
- Comprobación de los códigos
- Verificación analítica

- Comparación cruzada entre códigos
- Validación empírica

En el pasado se han realizado numerosos ejercicios de validación del software de simulación, siendo la IEA uno de los agentes más activos al respecto. La tabla 2.1 presenta los trabajos realizados que incluyen algún componente de validación de códigos de simulación.

Desde una perspectiva europea, un importante esfuerzo de validación se dedicó en el seno del proyecto europeo PASSYS (Jensen, 1993). En la segunda fase de PASSYS el principal énfasis se dedicó a la validación de modelos empíricos. La descripción completa de los resultados se puede encontrar en (Jensen, 1993) y de forma más resumida en (Palomo, 1991; Palomo, 1993; Strachan, 2008).

Así, se puede concluir **que la validación del software de simulación es un proceso continuo que mejora sucesivamente los modelos para que se ajusten más a la realidad.** Por ello, su empleo en la evaluación energética experimental de edificaciones en condiciones reales de uso está justificado. En la siguiente sección se describen las características principales del código de simulación escogido para el desarrollo de este trabajo.

2.2.4. DESCRIPCIÓN DEL MODELO EMPLEADO.

En la actualidad, existen numerosos códigos de simulación dinámica para la evaluación energética de edificios en el mercado, la mayoría de ellos orientados a la práctica habitual de arquitectos e ingenieros en el ámbito de la edificación. El Departamento de Energía estadounidense ofrece una exhaustiva lista del software disponible a nivel mundial (BES, 2012). Entre los códigos de simulación dinámica de edificios más populares se encuentran DOE-2 (US-DOE, 1980), desarrollado por el Departamento de Energía estadounidense, ESP-r (Clarke, 1988), desarrollado por la Universidad de Strathclyde y TRNSYS (TRNSYS, 1975), desarrollado por la Universidad de Wisconsin-Madison.

En la actualidad y de forma general el software se trata de un producto complejo y que requiere de un periodo formativo elevado hasta conseguir una cierta pericia en su manejo, especialmente en el caso de la simulación del comportamiento energético de edificaciones. Es un hecho reconocido que para la resolución de un problema determinado existe más de una herramienta que permite abordarlo. Por otra parte, ninguno de los paquetes de software disponibles es capaz de responder por sí solo a todas las necesidades de un analista energético (Hong, 2000).

Desde el punto de vista del usuario, existen principalmente tres factores a tener en cuenta a la hora de seleccionar un determinado código de simulación. En primer lugar, el software debe resultar adecuado para el problema a resolver, sin estar innecesariamente sobredimensionado. En segundo lugar se debe adecuar a los recursos económicos disponibles; el software de simulación es habitualmente una herramienta que requiere de una fuerte inversión económica. En último lugar, pero no por ello menos importante, debe disponer de una

Proyecto	Año	Referencia	Ámbito
IEA-ECBCS Annex 1	1977- 1980	Faber, 1980; DOE, 1981	Comparación cruzada entre códigos. Las predicciones muestran amplias variaciones (25% en valores diarios y 30% en picos de demanda). Se emplea un edificio monitorizado pero se concluye que la precisión de la medida no es adecuada.
IEA-ECBCS Annex 4	1979- 1982	BRE, 1984	Comparación de predicciones con datos experimentales en un edificio comercial en Glasgow. Nueve programas de simulación involucrados en el estudio. Se encuentra un buen acuerdo entre los códigos, pero lejos de los datos experimentales.
IEA-SHC Task 8	1982- 1988	Task 8	11 programas comparados con datos procedentes de células de ensayo en Canadá. Cinco de los programas se compararon con datos del sector residencial. Se concluye que hay un “rango razonable de variación en las demandas y los picos de temperatura”
IEA-ECBCS Annex 10	1984- 1986	McLean, 1985; Lebrun, 1988; Morant, 1986	Comparación cruzada entre programas de simulación de sistemas activos de climatización. Se desarrolla una base de datos de componentes pero no se efectúan comparaciones con datos experimentales. Los resultados ofrecidos varían en el nivel de detalle.
IEA-ECBCS Annex 21	1988- 1993	Annex 21	Estudio con verificación analítica, comparación cruzada (BESTEST) y validación empírica basada en datos de habitaciones de ensayo. La mayoría de los programas subestiman el aporte energético. Se establecen rangos de referencia para la realización de Test de comparación cruzada.
IEA-SHC Task 22	1996- 2002	Task 22	Comparación cruzada entre programas como ampliación del BESTEST con sistemas activos de calefacción radiante y sistemas activos de refrigeración.
IEA ECBCS Annex 41	2003- 2007	Annex 41	Comparación cruzada entre programas de simulación. Se extiende el BESTEST para incluir todo el edificio con respecto a calefacción, humedad relativa y movimientos de aire.
IEA ECBCS Annex 42	2003- 2007	Annex 42	Desarrollo de modelos de micro-cogeneración para incorporar en la simulación del edificio completo. Validación cruzada entre códigos y validación empírica.
IEA-SHC Task34/ IEA-ECBCS Annex 43	2003- 2007	Annex 43	Análisis comparativo de la modelización de la transferencia de calor hacia el terreno. Test comparativos de movimientos de aire mutizona, ventilación mecánica, iluminación natural y doubles fachadas.

Tabla 2.1. Programas de validación de códigos de simulación energética de edificios llevados a cabo en el seno de programas de la IEA.

adecuada provisión de ayuda. Esta provisión de ayuda debe valorarse de acuerdo a tres criterios: la facilidad en el manejo del propio software, el soporte técnico proporcionado por los distribuidores y la disponibilidad tanto de bibliotecas de componentes como de una comunidad activa que permita el intercambio de experiencias de una forma eficaz y fiable. Desde el punto de vista del desarrollador, el software debe cumplir con criterios bien establecidos en la comunidad relativos a la gestión de la información, ingeniería y control de calidad del software, y una adecuada interfaz humano-máquina (Sommerville, 1995; Manns, 1996).

Este trabajo de investigación que se resume en esta Memoria, se encuentra embebido en el contexto de un proyecto más general y que se describe en la siguiente sección, que implica la evaluación tanto de sistemas pasivos de la edificación como de sistemas activos. Aunque, como en muchos ámbitos relacionados con la ingeniería, se trata de una distinción difusa se considera sistema pasivo de climatización aquel que no incorpora elementos electromecánicos (como, por ejemplo, una fachada ventilada). Por el contrario, un sistema de climatización activo es aquel que necesita de elementos electromecánicos para cumplir correctamente su función (como, por ejemplo, una instalación solar térmica o un radiador). En el seno de dicho proyecto y basándose en la experiencia de nuestro grupo de investigación, se seleccionó TRNSYS como la herramienta de simulación más apropiada para la evaluación energética tanto de los sistemas pasivos como de los sistemas activos asociados a edificaciones. A continuación se hace una descripción de las características principales del código así como de la implementación matemática del modelo del edificio.

2.2.4.1. EL SOFTWARE TRNSYS

TRNSYS es el acrónimo inglés para A TRAnSient SYstems Simulation Program (un programa de simulación dinámica de sistemas) y su primera versión fue desarrollada en 1975 por el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de Wisconsin. Desde entonces, una colaboración internacional formado por el equipo estadounidense de Wisconsin, un equipo francés del CTSB y un equipo alemán denominado TRANSSOLAR se ocupan de su actualización y mantenimiento. Se trata de un software ampliamente empleado a nivel internacional con una comunidad muy activa de usuarios que ha participado en todos los ejercicios de validación propuestos por la IEA y, de hecho, ha sido el único que ha participado en el más reciente ejercicio de validación como simulación completa de un edificio en la Task 34, lo que dio lugar al lanzamiento de la versión comercial número 17 en julio de 2010.

TRNSYS es un software de simulación dinámica de sistemas con una estructura modular que se emplea principalmente en la simulación de sistemas térmicos y eléctricos, aunque puede aplicarse a otros sistemas dinámicos como la gestión del tráfico urbano o procesos biológicos. Reconoce un lenguaje de descripción de sistemas de alto nivel en el que el usuario puede especificar componente a componente y la manera en que éstos interactúan entre sí. En un nivel más bajo, cada uno de los componentes es representado por una rutina escrita en el lenguaje FORTRAN que se combinan para formar un archivo ejecutable controlado por otro

archivo de entrada que define exactamente los componentes físicos presentes y su interacción. En el seno del programa a cada una de estas rutinas se les denomina 'Types' y se identifican por un número natural. Es una práctica común en la comunidad de usuarios de TRNSYS hablar de Types en lugar de subrutinas o modelos.

Desde esta perspectiva, se pueden distinguir dos partes claramente diferenciadas en el software. El denominado 'núcleo' (kernel), un motor de cálculo que lee y procesa el archivo de entrada y se ocupa de resolver iterativamente las ecuaciones diferenciales que definen el sistema dinámico, ocupándose de todos los aspectos relativos a la inversión de matrices, regresiones lineales, determinación de propiedades termofísicas, etc. La segunda parte del programa es una 'biblioteca de componentes' que cubren desde componentes como bombas, tuberías, captadores solares o procesadores de radiación solar hasta el modelo de un edificio. Este último es, con diferencia, el Type más complicado del sistema y se denomina Type 56. Es conveniente destacar en este punto que, aunque el software se distribuye como propiedad intelectual de la Universidad de Wisconsin-Madison es de código abierto, esto es, se puede acceder al código FORTRAN para modificarlo o crear nuevo código en la forma de nuevos Types que modelicen componentes no incluidos en las bibliotecas oficiales. De hecho, muchos centros de investigación disponen de su propia biblioteca de componentes, reutilizables por el resto de la comunidad científica.

Desde el punto de vista de la facilidad para su uso, dispone de una interfaz gráfica que permite el ensamblaje de los Types de una forma intuitiva (IISIBAT). Dada su complejidad particular, el Type56 dispone de otra interfaz gráfica (TRNBuild) que permite una gestión de la información que minimiza los posibles errores humanos en la introducción de los datos característicos de cada sistema. Otra de las diferencias del Type56 es que necesita de un programa adicional de preprocesado (PREBID) antes de introducir el código en la simulación.

Como se ha mencionado anteriormente, este trabajo se encuadra dentro de un proyecto más general que implica a más investigadores. De hecho, la versión 17 del software fue publicada oficialmente cuando el proyecto se encontraba en su fase de análisis. Por ello en esta investigación se ha empleado la versión anterior del software, la 16. Es conveniente destacar en este punto que las verificaciones de la última versión del software se han realizado mediante comparación cruzada con otros códigos, no mediante validación empírica.

En la sección siguiente se describen las aproximaciones físicas y numéricas que dan lugar al modelo en espacio de estados de un edificio de forma general.

2.2.4.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE EDIFICIO.

El modelo del edificio incluido en las subrutinas FORTRAN es un modelo en espacio de estados, representados por las temperaturas del aire interior. Como salidas del modelo se pueden escoger variables más generales que impliquen balances energéticos sobre otros elementos del edificio. El balance energético fundamental se construye a partir de un balance energético con un nodo de aire por zona, que representa la capacidad calorífica tanto del

volumen de aire como de aquellas partes íntimamente conectadas con él (como, por ejemplo, el mobiliario). Por ello, la capacidad calorífica del nodo de aire es un parámetro adicional del modelo.

Para establecer el balance, se ha de calcular en primer lugar **el flujo de calor por convección al nodo de aire**:

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{surf,i} + \dot{Q}_{inf,i} + \dot{Q}_{vent} + \dot{Q}_{g,c,i} + \dot{Q}_{cplg,i}, \text{ (ec. 2.11) donde}$$

$\dot{Q}_{surf,i}$ es el intercambio de calor entre cada una de las superficies que limitan al nodo de aire y el propio nodo.

$\dot{Q}_{inf,i}$, es las ganancias por infiltración,

$\dot{Q}_{vent,i}$, es las ganancias por ventilación,

$\dot{Q}_{g,c,i}$, es las ganancias internas convectivas (ocupación, equipamiento eléctrico, iluminación, etc.),

$\dot{Q}_{cplg,i}$, es el intercambio de calor con otras zonas del edificio.

A continuación se detalla el cálculo de cada uno de estos términos para, finalmente, exponer la resolución detallada de las ecuaciones diferenciales que gobiernan la evolución dinámica del sistema.

2.2.4.2.1. INTERCAMBIO RADIATIVO ENTRE SUPERFICIES.

$$\dot{Q}_{r,w} = \dot{Q}_{g,r,i,w} + \dot{Q}_{sol,w} + \dot{Q}_{long,w} + \dot{Q}_{wall-gain}, \text{ (ec. 2.12) donde}$$

$\dot{Q}_{r,w}$, son las ganancias radiativas en la superficie de la pared, $\dot{Q}_{g,r,i,w}$ es el flujo de calor radiativo que absorbe la pared debido a las ganancias internas, $\dot{Q}_{sol,w}$ es las ganancias solares a través de las ventanas recibida por las paredes, $\dot{Q}_{long,wi}$ es el intercambio radiativo de onda larga entre la pared y el resto de las paredes y ventanas y $\dot{Q}_{wall-gain}$ es un flujo que puede representar la generación interna.

2.2.4.2.2. INTEGRACIÓN DE PAREDES Y VENTANAS.

Las paredes se modelizan de acuerdo con las relaciones en función de transferencia para la solución de la ecuación del calor de Mitalas y Arseneault (Stephenson, 1971; Mitalas, 1971; Lechner, 1992).

De forma que, para cada una de las paredes:

$$\dot{q}_{s,i} = \sum_{k=0}^{n_{bs}} b_s^k T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{cs}} c_s^k T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{ds}} d_s^k \dot{q}_{s,i}^k, \text{ (ec. 2.13)}$$

$$\dot{q}_{s,o} = \sum_{k=0}^{n_{as}} a_s^k T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{bs}} b_s^k T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{ds}} d_s^k \dot{q}_{s,o}^k, \text{ (ec. 2.14)}$$

Que constituyen una serie temporal de ecuaciones en términos únicamente de las temperaturas y de los flujos térmicos en la superficie y equiespaciados temporalmente. El superíndice k se refiere al orden en la serie temporal. Para una base de tiempos específica, los coeficientes de la serie temporal (a, b, c y d) se determinan mediante el método de la transformada z. Otros métodos análogos han sido desarrollados basados en la solución de las ecuaciones de Cardano para un esquema en diferencias finitas, mostrando la validez del método en un ámbito más general (Urbikain, 2012; Davies, 2004a; Davies, 2004b; Davies, 2003).

Bajo este esquema numérico, una ventana se modeliza como un muro exterior sin masa térmica, parcialmente transparente a la radiación solar pero opaco en lo que a los intercambios de calor mediante radiación de onda larga se refiere. Se considera que la absorción de radiación de onda larga ocurre solamente en las superficies.

La validación de este modelo se hizo en el seno del programa PASSYS (Voit, 1994).

2.2.4.2.3. EL INTERCAMBIO DE ONDA LARGA

El intercambio de radiación de onda larga entre las diferentes superficies que configuran la zona térmica y el flujo de calor convectivo entre las superficies y el aire se calculan mediante una aproximación empleando una red estrella (Seem, 1987) y representada en la figura.2.9. Este método emplea una temperatura equivalente para el nodo de aire (T_{star}) para considerar en paralelo el flujo de energía convectivo de cada superficie al nodo de aire y radiativo con el resto de las superficies que definen la zona. Este método ha sido comparado con un modelo detallado de edificio desarrollado por la Universidad de Lund, mostrando un buen acuerdo en el cálculo de las temperaturas de superficie (Holst, 1993). También se ha demostrado que el empleo de un modelo que emplea un coeficiente de transferencia de calor que combine los efectos convectivos y radiativos muestra diferencias significativas (IEA, task 13, 1994).

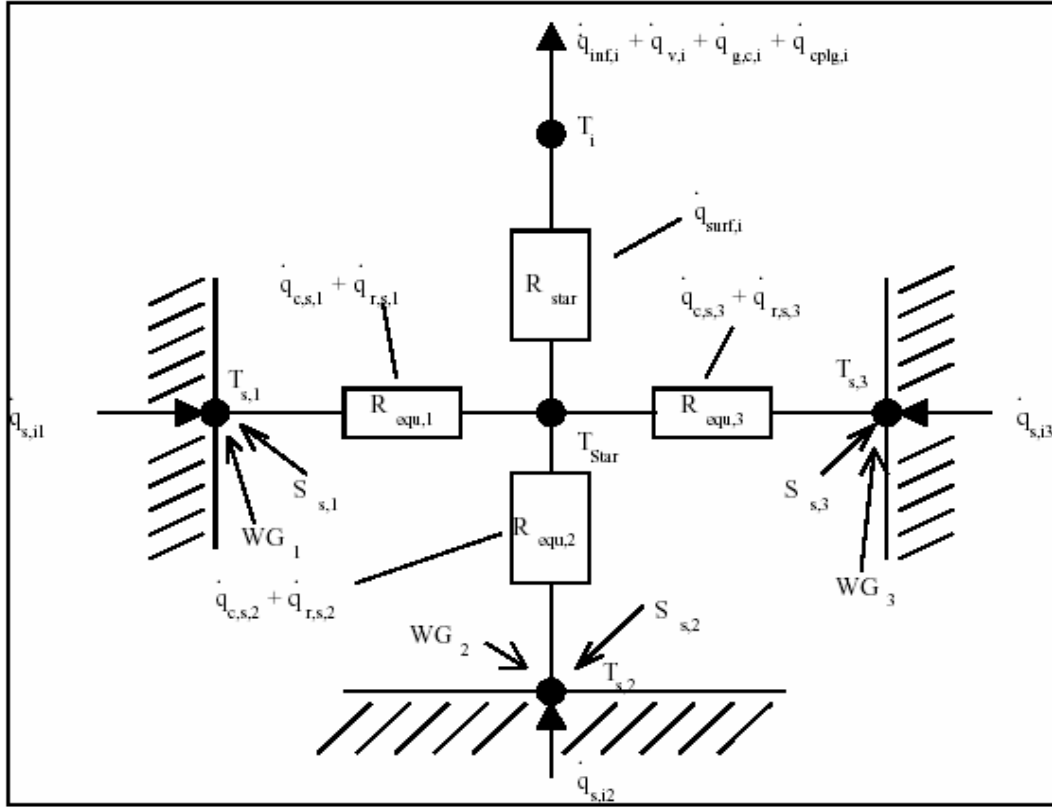


Figura 2.9. Red eléctrica equivalente para el cálculo del intercambio radiativo según el algoritmo de Seem (Seem, 1987).

Donde,

$$R_{STAR,i} = f(\alpha_i, A_{S,i}) = \frac{1}{Q_{S,i}} (T_{STAR} - T_i), \text{ (ec. 2.15)}$$

Los métodos de cálculo detallados para $R_{equiv,i}$ y $R_{STAR,i}$ se puede encontrar en Seem, 1987. En dichos métodos de cálculo se emplean las relaciones entre las áreas para obtener los factores de absorción relativos a cada superficie. La temperatura estrella es empleada para calcular el flujo neto de calor (convectivo y radiativo) desde la superficie interior del muro:

$$\dot{q}_{comb,s,i} = \dot{q}_{c,s,i} + \dot{q}_{r,s,i}, \text{ (ec. 2.16)}$$

Entonces,

$$\dot{q}_{comb,s,i} = \frac{1}{R_{equiv,i} A_{s,i}} (T_{s,i} - T_{star}), \text{ (ec. 2.17)}$$

Donde,

$\dot{q}_{comb,s,i}$ es el flujo de calor combinado convectivo y radiativo.

$A_{s,i}$ es el área interior de la superficie i.

Para las superficies externas el intercambio de radiación de onda larga se considera explícitamente empleando la temperatura efectiva de la bóveda celeste, T_{cielo} . La transferencia total de calor $\dot{q}_{\text{comb},s,o}$ es, entonces, la suma de las contribuciones convectiva y radiativa:

$$\dot{q}_{\text{comb},s,o} = \dot{q}_{c,s,o} + \dot{q}_{r,s,o}, \text{ (ec. 2.18)}$$

Con

$$\dot{q}_{c,s,o} = h_{\text{conv},so} (T_{a,s} - T_{s,o}), \text{ (ec. 2.19)}$$

$$\dot{q}_{r,s,o} = \sigma \varepsilon_{s,o} (T_{s,o}^4 - T_{\text{cielo}}^4), \text{ (ec. 2.20)}$$

$$T_{\text{cielo}} = (1 - f_{\text{cielo}}) T_{a,s} + f_{\text{cielo}} T_{\text{cielo}}, \text{ (ec. 2.21)}$$

Así, los balances energéticos en la superficie se pueden expresar como:

$$\dot{q}_{s,i} = \dot{q}_{\text{comb},s,i} + S_{s,i} + W_g, \text{ (ec. 2.22)}$$

$$\dot{q}_{s,o} = \dot{q}_{\text{comb},s,o} + S_{s,o}, \text{ (ec. 2.23)}$$

Para superficies interiores $S_{s,i}$ incluye tanto los intercambios de onda larga como los de onda corta mientras que para superficies exteriores $S_{s,o}$ solamente incluye la radiación solar. El término W_g se incluye para permitir la modelización de ganancias de calor en el interior de las paredes como puede ser el caso de la introducción de elementos activos integrados en los elementos constructivos.

Basándose en lo anterior, se puede expresar el flujo de calor interior como:

$$\dot{q}_{s,i} = B_s T_{a,s} - C_s T_{\text{STAR},i} + D_s, \text{ (ec. 2.24)}$$

Donde

$$B_s = \frac{e_s h_{s,o}}{1 - f_s}, \text{ (ec. 2.25)}$$

$$C_s = \frac{f_s \left(\frac{1}{R_{\text{equiv},i} - A_{s,i}} \right)}{1 - f_s}, \text{ (ec. 2.26)}$$

$$D_s = \frac{f_s S_{s,i} + e_s (S_{s,o} - k_{s,o}) + K_{s,i}}{1 - f_s}, \text{ (ec. 2.27)}$$

$$e_s = \frac{b_s^0}{a_s^0 + h_{s,o}}, \text{ (ec. 2.28)}$$

$$f_s = (b_s^0 e_s - c_s^0) R_{\text{equiv},i} A_{s,i}, \text{ (ec. 2.29)}$$

Los valores de $K_{s,i}$ y $K_{s,o}$ se definen mediante las ecuaciones de las funciones de transferencia:

$$K_{s,i} = \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{c_s}} c_s^k T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k \dot{q}_{s,i}^k, \text{ (ec. 2.30)}$$

$$K_{s,o} = \sum_{k=0}^{n_{a_s}} a_s^k T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k q_{s,o}^k, \text{ (ec. 2.31)}$$

2.2.4.2.4. RESOLUCIÓN NUMÉRICA DE LA EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA TEMPERATURA DEL AIRE INTERIOR.

Una vez caracterizados los diferentes flujos de calor presentes en el edificio, la evolución temporal de la temperatura interior seguirá la ley:

$$C_i \frac{d}{dt} T_i = \dot{Q}_i, \text{ (ec. 2.32)}$$

Donde C_i es la capacidad calorífica asociada al nodo i y que, como mínimo, debe ser igual a la del aire que representa. La ganancia neta de calor, \dot{Q}_i , es una función tanto de la temperatura del nodo como de la de los nodos adyacentes.

Para resolver este conjunto de ecuaciones diferenciales en primer lugar se discretiza la variable temporal y se denomina a su incremento paso de simulación. Acto seguido, se considera \dot{Q}_i constante a cada paso de simulación y evaluado en los valores medios de las temperaturas de las zonas. En este caso, la solución de la ecuación diferencial anterior para la temperatura final de un intervalo dado de tiempo es:

$$T_{i,\tau} = T_{i,\tau-\Delta t} + \frac{\bar{\dot{Q}}_i \Delta t}{C_i}, \text{ (ec. 2.33)}$$

Donde:

Δt es el paso de la simulación y $T_{i,\tau-\Delta t}$ es la temperatura de la zona al comienzo del paso de simulación.

La variación de la temperatura es lineal, de tal forma que la media es:

$$T_i = \frac{T_{i,\tau} + T_{i,\tau-\Delta t}}{2} \text{ (ec. 2.34)}$$

Si se resuelve la relación anterior para $T_{i,\tau}$ y se introduce el resultado en la expresión para la temperatura final del intervalo junto con las expresiones detalladas para la ganancia neta de calor se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{2C_i(\bar{T}_i - T_{i,\tau-\Delta t})}{\Delta t} &= \sum_{j=1}^{\# \text{zonas}} \sum_{\text{sup. } i \rightarrow j} m_{cp1g,s} C_p \bar{T} + m_{inf,i} C_p T_a + \sum_{\text{contorno}} \frac{d}{dt} m_{icp1g,s} C_p T_{b,s} - \\ &- \left(\frac{1}{R_{STAR}} - \sum_{\text{contorno}} m_{cp1g,i} + \sum_{\text{sup. } i \rightarrow j} m_{cp1g,s} + m_{inf,i} m_{v,i} \right) \bar{T}_i + \sum m_{v,k} C_p T_{v,k} + \dot{Q}_{g,c,i} \end{aligned} \text{ (ec. 2.35)}$$

Y, por otra parte,

$$\begin{aligned} &\left(\frac{1}{R_{STAR,i}} - \sum_{\text{paredes_interiores}} A_s B_s + \sum_{\text{sup. superficies } i} A_s C_s \right) \bar{T}_{STAR,i} - \left(\sum_{\text{paredes_adyacentes}} \sum_{\text{sup. } s,i \rightarrow j} A_s B_s \right) \bar{T}_{STAR,j} - \frac{1}{R_{STAR,i}} \bar{T}_i = \text{ (ec. 2.36)} \\ &= \left(\sum_{\text{sup. superficies_exteriores}} A_s B_s \right) T_a + \sum_{\text{contorno}} A_s B_s T_{b,s} + \sum_{\text{sup. superficies } i} A_s (D_s + S_{s,i}) \end{aligned}$$

Una vez escritas estas relaciones para todas las zonas, el sistema de ecuaciones se puede expresar en su forma matricial como:

$$[X] = [\bar{T}][Z], \text{ (ec. 2.37)}$$

Estas matrices se pueden particionar de la siguiente forma:

$$[X] = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{bmatrix}, \text{ (ec. 2.38)}$$

$$[\bar{T}] = \begin{bmatrix} \bar{T}_1 \\ \bar{T}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{T} \\ \bar{T}_{STAR} \end{bmatrix}, \text{ (ec. 2.39)}$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix}, \text{ (ec. 2.40)}$$

Donde:

$$X_{11,ii} = \left(\sum_{\sup s.i \rightarrow j} \dot{m}_{cp1g,s} + \dot{m}_{inf,i} + \dot{m}_{v,i} \right) C_p + \frac{2C_i}{\Delta t} + \frac{1}{R_{STAR,j}} + \sum_{\text{contorno}} \dot{m}_{cp1g,i}, \text{ (ec. 2.41)}$$

$$X_{11ij} = \sum_{\sup s.i \rightarrow j} \dot{m}_{cp1g,s} C_p, \forall i \neq j, \text{ (ec. 2.42)}$$

$$X_{12,ii} = \frac{1}{R_{STAR,i}}, \text{ (ec. 2.43)}$$

$$X_{12,ij} = 0, \forall i \neq j, \text{ (ec. 2.44)}$$

$$X_{21,ii} = -\frac{1}{R_{STAR,i}}, \text{ (ec. 2.45)}$$

$$X_{21,ij} = 0, \text{ (ec. 2.46)}$$

$$X_{22,ii} = \sum_{\text{paredes_internas}} A_S B_S + \sum_{\sup s,i} A_S C_S, \text{ (ec. 2.47)}$$

$$X_{22,ij} = - \sum_{\text{zonas_adyacentes}} \sum_{\sup s,i \rightarrow j} A_S B_S, \text{ (ec. 2.48)}$$

$$Z_{1,i} = \dot{m}_{inf,i} C_p T_a + \sum_{\sup s.i \rightarrow j} \dot{m}_{cp1g,s} C_p T_{b,s} + \sum_{k=1}^{\# \text{ ventilaciones}} \dot{m}_{v,k,i} C_p T_{v,k}, \text{ (ec. 2.49)}$$

$$Z_{2,i} = \left(\sum_{\text{superficies_exteriores}} A_S B_S \right) T_a + \sum_{\text{contorno}} A_S B_S T_{b,s} + \sum_{\sup s,i} A_S (D_S + S_{s,i}), \text{ (ec. 2.50)}$$

Entonces, para el caso de la evolución de las temperaturas se tiene:

$$[\bar{T}] = [X]^{-1}[Z], \text{ (ec. 2.51)}$$

Y obtener la temperatura de cada nodo como:

$$T_{i,\tau} = 2\bar{T}_i - T_{i,\tau-\Delta t}, \text{ (ec. 2.52)}$$

Lo que completa el esquema de cálculo de la evolución dinámica de las temperaturas. En la siguiente sección se describe el proyecto en el que se enmarca el trabajo de investigación que se expone en este documento.

2.3. EL PROYECTO PSE-ARFRISOL.

El proyecto PSE-ARFRISOL es un Proyecto de Investigación Singular y Estratégico subvencionado inicialmente por el Ministerio de Educación y Ciencia (MEC) y después por el Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN) en la convocatoria de 2005 y hasta 2011 del Plan Nacional de Investigación y Desarrollo y financiado con fondos FEDER. El proyecto PSE-ARFRISOL aglutina, bajo la coordinación del CIEMAT, diferentes entidades tanto del sector público como del sector privado. Del sector público participa la Universidad de Oviedo y la Universidad de Almería. Desde el sector privado en el proyecto se involucran importantes empresas constructoras españolas (Dragados, SEIS, OHL, Acciona, FCC), empresas tecnológicas (Grupo Unisolar, Atersa, 9 Ren (antigua Gamesa Solar), Isofotón y Climatewell), sociedades científicas civiles (Real Sociedad Española de Física) y Fundaciones (Fundación Barredo).

El PSE-ARFRISOL fue concebido con el objetivo principal de demostrar que la arquitectura bioclimática y la energía solar de baja temperatura son los elementos básicos adecuados para conseguir que la edificación del futuro sea energéticamente eficiente. Consciente de los problemas derivados del fuerte aumento en el número de sistema de aire acondicionado en países del sur de Europa, el proyecto ARFRISOL ha prestado especial atención al desarrollo de técnicas de enfriamiento pasivo y activo (absorción) que mejoren el rendimiento térmico de los edificios durante el verano.

Este objetivo general se concreta en los siguientes objetivos parciales:

- Conseguir ahorro de energía y un uso racional de la que se utilice, en unos contenedores – demostradores de la investigación contruidos para tal fin en 5 zonas climáticas españolas distintas, que abarcan una parte representativa de la climatología española peninsular, de norte a sur, cuantificando los resultados obtenidos y proponiendo estrategias para su implantación en general en cualquier tipo de edificación.
- Definir modelos de integración de estrategias de energía solar pasiva y activa para calefacción y refrigeración con parámetros que incluyan: zonas climáticas, tipologías, sistemas,...
- Demostrar a los distintos colectivos implicados (arquitectos, ingenieros, promotores...) que funciona este tipo de edificaciones y para estos usos (oficinas), es decir educar a estos colectivos con datos objetivos y cuantificados.
- Formar a los profesionales (aparición del Código Técnico de la Edificación, CTE, 2006) desarrollando el material de formación oportuno y con la transferencia tecnológica

necesaria, a partir de la obtención de datos y experiencias reales que servirán de base para elaborar el material educativo.

- Optimizar (de forma general) los elementos que se utilizan (diseños, modelos, captadores, paneles, ...) mejorando los que existen o desarrollando otros nuevos para poner equipos comerciales en el mercado analizados en cuanto a su comportamiento y a todos los niveles: energéticos, económicos, tecnológicos, etc..
- Concienciar al usuario y a la sociedad en general de la posibilidad de construir edificios energéticamente muy eficientes, con datos y valores reales contrastados, haciendo especial énfasis en el ahorro económico que para los usuarios y la sociedad supone la introducción en la edificación de las estrategias pasivas y activas y por lo tanto conseguir, en un futuro próximo un "Cambio de Mentalidad" en la utilización de la energía en el sector edificación, haciendo extensible los resultados obtenidos en estos edificios (oficinas) a los de otros usos tanto residenciales como no residenciales (sector servicios).
- Todas las consideraciones y los aspectos de análisis que han de tenerse en cuenta en todos estos objetivos deben ser Económicos / Dinámicos / Técnicos / Cuantificables / Realizables e Industrializables; poderse analizar la posible exportación (exportabilidad) y globalización a la vivienda (u otros tipos de edificación) y así poder mejorar uno de los mayores sumideros energéticos que existen actualmente en España.

Para conseguir estos objetivos parciales el proyecto se planifico en once subproyectos relacionados, concatenados entre sí y en ocasiones simultáneos. Los once subproyectos se enumeran a continuación junto a una breve descripción de su contenido, según se recoge en su memoria técnica. La figura 2.10 presenta un diagrama conceptual de los diferentes subproyectos.

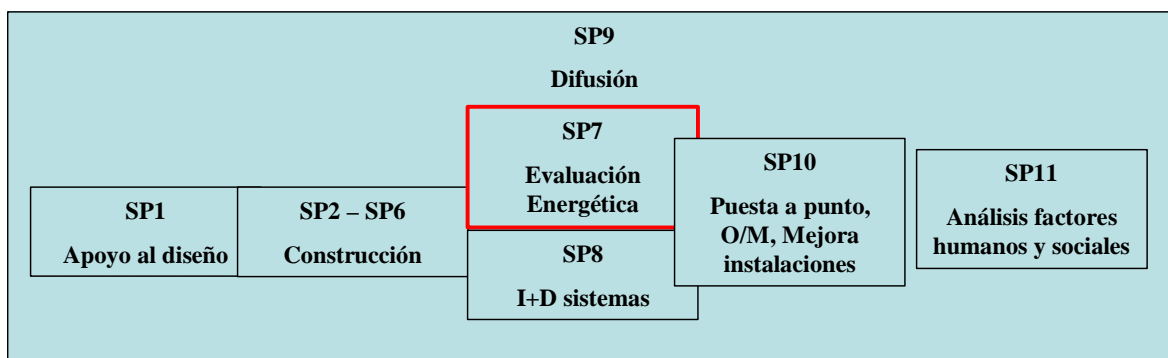


Figura 2.10. Esquema relacional de los diferentes subproyectos del PSE-ARFRISOL

SUBPROYECTO 1: Trabajos previos a la Construcción de los C-Ddl.

En este subproyecto se llevan a cabo todas las investigaciones necesarias, antes de la construcción de los C-Ddl, con la finalidad de pretender obtener los mejores resultados desde el punto de vista energético en cada uno de ellos considerando los diferentes emplazamientos.

Los siguientes cinco subproyectos se refieren a la I+D necesaria, partiendo de la situación específica en la que se encuentran los diferentes C-DdI hasta su completa construcción. En la figura 2.11 se representa gráficamente su localización en la geografía peninsular.



Figura 2.11. Localizaciones de los C-DdI sobre la península Ibérica.

SUBPROYECTO 2: C-DdI en la Universidad de almería

SUBPROYECTO 3: C-DdI en el CIEMAT (ED70).

SUBPROYECTO 4: C-DdI en la PSA.

SUBPROYECTO 5: C-DdI de la Fundación Barredo en Siero (Asturias).

SUBPROYECTO 6: C-DdI en el CEDER (Soria).

SUBPROYECTO 7: Evaluación energética.

Estudio y evaluación energética de los 5 C-DdI para comprobar su funcionamiento global en condiciones reales de uso durante como mínimo un año, así como de los diferentes sistemas específicos construidos en cada uno de los mismos. Además se analizara la calidad del aire interior que existe en cada uno de ellos.

SUBPROYECTO 8: I+D de sistemas.

Profundiza en toda la I+D desarrollada en las diferentes tecnologías consideradas en los subproyectos anteriores, tanto desde un perspectiva de investigación básica, aplicada y de innovación como de estudios precomerciales de los prototipos experimentales existentes.

SUBPROYECTO 9: Difusión.

Elaboración de los documentos oportunos donde se recojan los resultados de todos los trabajos de I+D+i llevados a cabo en este PSE-ARFRISOL y dirigidos a todos estamentos, sectores y agentes implicados en este amplio campo de actividad y uso como es la edificación

y la energía que se necesita para el acondicionamiento térmico y que puede ser reducida utilizando energía solar.

En la convocatoria del Plan Nacional de I+D+i de 2008, tras tres años de proyecto, se contempló la necesidad de ampliar sus objetivos abriendo dos nuevos subproyectos, el 10 y 11. El objetivo de los dos nuevos subproyectos es estudiar estas instalaciones que son singulares por sus características en cuanto al acoplamiento de diferentes tipologías propiciando su mantenimiento y proponiendo la mejora y optimización de las mismas y por otro lado el realizar el análisis de los factores humanos y sociales de este tipo de edificación tomando como base el análisis del comportamiento de los usuarios de los 5 C-Ddl.

SUBPROYECTO 10: Puesta a punto, mantenimiento, mejora y optimización de las instalaciones de los 5 C-Ddl's (Nuevo subproyecto en 2008).

Realiza la Puesta a punto, Operación, Mantenimiento, Mejora y Optimización de las diferentes instalaciones que tienen los C-Ddl's desarrollados en y para el PSE-ARFRISOL en los 5 diferentes emplazamientos con climatologías también distintas, y así comprobar desde un punto de vista global, desde los sistemas más comerciales hasta los diferentes sistemas específicos y experimentales contruidos e instalados en cada uno de los C-Ddl's.

SUBPROYECTO 11: Análisis de los Factores Humanos y Sociales en Edificios Sostenibles a partir de los 5 C-Ddl's (Nuevo subproyecto en 2008).

Se pretende dar respuesta a la necesidad del estudio de alguna de las dimensiones sociales y humanas vinculadas a este tipo de edificaciones. Por lo tanto en la investigación propuesta se realiza el estudio psico-social de los usos, percepciones y niveles de satisfacción de los usuarios de los 5 C-Ddl, así como explora las percepciones de los ciudadanos y los actores económicos, para concluir con la pretensión de alcanzar una mayor visibilidad y difusión pública de la arquitectura bioclimática e integración de la energía solar en los edificios y de las acciones realizadas en el marco del PSE- ARFRISOL.

Así pues, **una parte importante de este trabajo de investigación que en este documento se expone se encuadra dentro de los trabajos comprendidos en el seno del SP7 del PSE-ARFRISOL, concretamente los correspondientes al SP4, dentro de la evaluación energética experimental en condiciones reales de uso mediante el ajuste de los modelos de simulación para la parte pasiva del C-Ddl.**

2.4. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.

A modo de resumen, a lo largo de este capítulo se han abordado las siguientes cuestiones:

- Se ha contextualizado la influencia relativa del sector de la edificación con respecto al consumo energético mundial y de forma más detallada al consumo de energía en España. **Aproximadamente un tercio de la energía total consumida por la sociedad se realiza en las edificaciones y, de ésta, más de la mitad se emplea en su acondicionamiento térmico.**

- Se realiza una definición de edificio desde el punto de vista de las leyes de la transferencia del calor y de modelo térmico del mismo, clasificándolos según diferentes criterios.
- Se definen los modelos en sus formulaciones en espacio de estados y en función de transferencia, mostrando las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos.
- Se ha revisado la experiencia previa del grupo investigador en la identificación de modelos en función de transferencia para la evaluación térmica de edificaciones y se han presentado algunos de sus beneficios y de sus limitaciones.
- En este trabajo se adopta un modelo de simulación dinámico como modelo en espacio de estados y se justifica la investigación sobre su idoneidad para representar el comportamiento energético de edificaciones en condiciones reales de uso.
- Se realiza una revisión del software de simulación, atendiendo principalmente a los ejercicios de validación que se han realizado sobre los mismos. En primer lugar los estudios realizados en diferentes grupo de trabajo llevados a cabo en la Agencia Internacional de la Energía y en segundo lugar desde la perspectiva de los proyectos europeos con estos mismos objetivos .
- Se describen en detalle las aproximaciones físicas y numéricas del software de simulación dinámica TRNSYS, elegido para el desarrollo de la investigación.
- Se describe el proyecto PSE-ARFRISOL, marco en el que se encuadra el trabajo de investigación descrito en esta Memoria.
- Concretamente, se identifica un objetivo doble para la investigación que esta Memoria describe. En primer lugar, evaluar la idoneidad del software de simulación para la evaluación energética experimental de edificaciones en condiciones reales de uso. En segundo lugar, evaluar la posibilidad de emplear dichos modelos en el marco del control predictivo de las edificaciones.

CAPÍTULO 3. DISEÑO EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se ha descrito el PSE-ARFRISOL, proyecto en el que se enmarca este trabajo. Concretamente, se empleará el C-Ddi del SP4, localizado en las instalaciones de la Plataforma Solar de Almería. Este C-Ddi ha sido seleccionado porque sus características constructivas le hacen más adecuado para el empleo de un software de simulación de propósito general. Este hecho se justifica dado que no tiene fachadas que impliquen movimientos de aire en su interior que modifiquen dinámicamente su comportamiento térmico, como galerías o fachadas ventiladas. En ese tipo de edificaciones (como es el caso de los otros C-Ddi del proyecto) la complejidad aumenta, dado que se debe disponer de modelos adecuados para dichos componentes constructivos, así como de la interacción entre ellos y el resto de la edificación.

En primer lugar se realiza una descripción del objeto de estudio, el C-Ddi de la PSA, atendiendo a sus características térmicas y a la evolución de su diseño arquitectónico y de sus instalaciones en el seno del PSE-ARFRISOL para ajustarse adecuadamente a las características del emplazamiento. En esta descripción se incluyen los parámetros de la simulación que se empleará en el diseño del experimento para obtener las medidas experimentales necesarias para la investigación que se quiere realizar.

El diseño experimental se basa en el concepto de parámetro activo de un modelo. Un parámetro activo de un modelo es aquel que al ser variado produce una perturbación del mismo orden en la respuesta del modelo. El diseño experimental parte de un análisis de sensibilidad que identifique los parámetros activos del modelo. Para realizar este análisis de sensibilidad se desarrollan las herramientas matemáticas (informáticas y numéricas) adecuadas en el entorno de simulación empleado. El análisis está basado en trabajos previos desarrollados para la task 22 del SHC de la IEA y permite analizar la correlación existente entre los parámetros activos identificados y la salida del modelo.

Con respecto a los trabajos anteriores, **el trabajo de investigación que se presenta en esta Memoria incluye una serie de novedades**, que se describirán en detalle más adelante en el texto:

- **Se definen los parámetros activos en función de su medida estadística asociada:** parámetros σ -activos y parámetros μ -activos.
- **Se demuestra que un modelo de salida única e igual a la temperatura del aire interior no es suficiente para resolver las correlaciones entre los parámetros activos del modelo.**
- Con el objetivo de aumentar el número de balances energéticos disponibles **se añaden nuevas variables de medida en el dispositivo experimental, basándose en los principios físicos que rigen el sistema.**
- **Se demuestra que hay un conjunto mínimo de variables de medida que permite resolver las correlaciones entre los parámetros activos del modelo y, por tanto, su identificación unívoca a partir de datos experimentales.**

Finalmente, se describe la instalación experimental final, incluyendo todos los aspectos relativos a las variables instaladas, al hardware de medida y a la selección de los recintos concretos del objeto bajo estudio. Para completar el diseño experimental se estima la incertidumbre en la medida empleando una metodología que tiene en cuenta todos los elementos de la cadena de medida.

3.2. DESCRIPCIÓN DEL C-DdI DE LA PSA

El C-DdI correspondiente al SP4 del PSE-ARFRISOL se encontraba bajo diseño arquitectónico antes de iniciarse el proyecto y el arquitecto fue asesorado con conceptos propios de la arquitectura bioclimática para realizar su trabajo. Una vez que se dispuso de un proyecto básico, en el seno del PSE-ARFRISOL se realizó un apoyo al diseño mediante simulación empleando modelos dinámicos en el edificio, que produjo una serie de modificaciones en el mismo y sirvió para identificar algunas de las características más sensibles del C-DdI con respecto a su comportamiento térmico y que han sido recogidas en el diseño del experimento.

3.2.1. PROYECTO ORIGINAL

El C-DdI del SP4 se encuentra en una ubicación singular, la PSA, en el desierto de Tabernas. La PSA está situada en el Sudeste de España en el Desierto de Tabernas a 37°05'27,8" de Latitud Norte y 2°21'19" de Longitud Oeste. Recibe una insolación directa anual por encima de los 1.900 kWh/(m²·año) y la temperatura media anual está en torno a los 17°C. Nos encontramos por tanto en clima mediterráneo cálido y semiárido.

El C-DdI se desarrolla a lo largo de un eje longitudinal, orientado norte-sur. Se distribuyen las salas a ambos lados de un pasillo cuya altura es mayor que las estancias que lo rodean, y éste queda ventilado por huecos existentes en su cara norte. Los despachos de uso habitual están situados en la cara sur del edificio, que es donde con mayor facilidad se alcanza el confort durante todo el año, debido al diseño realizado con el objetivo de maximizar el ahorro energético y el confort.

El proyecto original planteaba una serie de estrategias bioclimáticas que se describen a continuación (Extraídas de la memoria del proyecto original):

- La configuración del edificio en una sola planta lo dota en principio de una alta capacidad de captación, acumulación y difusión de calor.
- En los elementos constructivos predominan los muros compuestos por materiales de gran inercia térmica que aseguran un óptimo aislamiento del edificio.
- La concepción del edificio facilita el que las instalaciones de climatización tengan un carácter modular de tal manera que el confort térmico se consigue en todas las zonas del edificio de una manera individualizada.
- En el diseño se han introducido mecanismos de captación solar pasiva:

- Todos los huecos abiertos a fachada sur están protegidos por un voladizo de tal forma que permite la captación en invierno y protegen de la radiación solar en verano.
- El corredor tiene iluminación y ventilación cenital orientada a norte lo cual minimiza las ganancias en verano y las pérdidas en invierno, posibilitando además la ventilación en verano facilitando la salida de la masa de aire caliente en esta época. Este elemento genera además la ventilación cruzada dentro del edificio.
- Se identifican las estrategias de movimiento de aire más favorables entre distintas zonas para obtener confort y ahorrar energía en climatización. Para ello se estudiará detenidamente la posición y características de todos los huecos de puertas y ventanas.
- Para resolver la dotación de agua caliente sanitaria y la climatización de las distintas estancias que integran el edificio se ha diseñado una instalación de aprovechamiento de Energía Solar Térmica. Este sistema se compone fundamentalmente de un campo de captadores solares ubicados en la cubierta de las oficinas (sur) y de una sala de máquinas ubicada en la parte norte del edificio, con las unidades de tratamiento de aire (UTA's) situadas en la cubierta de los aseos, del cuarto de instalaciones y de reprografía (norte).

En las figuras 3.1. y 3.2 se muestran la sección y la planta del C-Ddl, respectivamente, según el diseño original. En la tabla 3.1 se resumen las superficies útiles de cada una de las estancias.

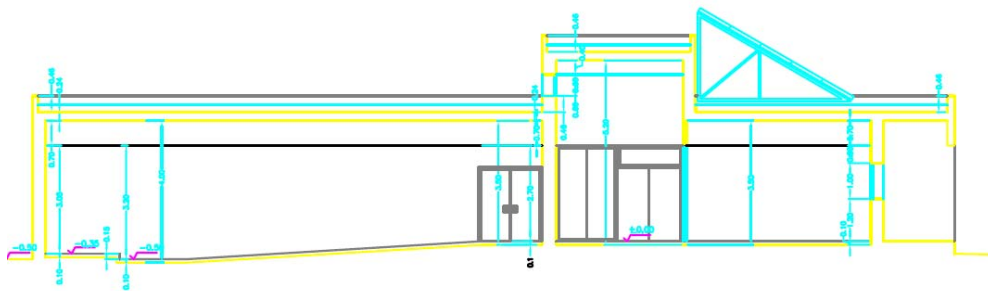


Figura 3.1. Sección del C-Ddl del SP4 según su diseño original.

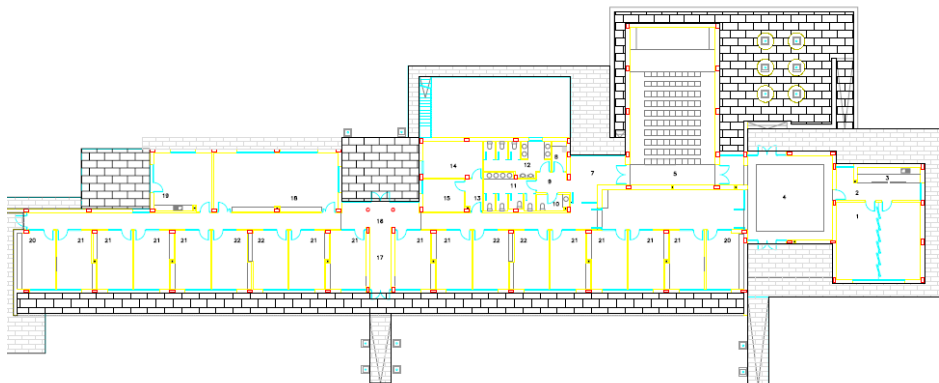


Figura 3.2. Planta del C-Ddi del SP4 según su diseño original.

CUADRO DE SUPERFICIES	
	SUP. ÚTIL
1. SALAS DE REUNIÓN	51.65 m2
2. PASO	13.37 m2
3. OFFICE	7.95 m2
4. VESTÍBULO	62.76 m2
5. SALA DE CONFERENCIAS	106.09 m2
6. RECEPCIÓN	45.13 m2
7. PASO	16.33 m2
8. CUARTO DE LIMPIEZA	3.38 m2
9. DISTRIBUIDOR	5.32 m2
10. ASEO DE MINUSVÁLIDOS	4.09 m2
11. ASEO DE MUJERES	13.91 m2
12. ASEO DE HOMBRES	15.96 m2
13. PASO	4.27 m2
14. CUARTO DE INSTALACIONES	16.98 m2
15. REPROGRAFÍA	10,51 m2
16. PASO	84.42 m2
17. VESTÍBULO	9.96 m2
18. BECARIOS	57.55 m2
19. SALA DE DESCANSO	26.47 m2
20. DESPACHO TIPO 1	17.19 m2
21. DESPACHO TIPO 2	17.35 m2
22. DESPACHO TIPO 3	17.4 m2
23. ZONA CUBIERTA 1	116,46 m2
24. ZONA CUBIERTA 2	22,66 m2
TOTAL ÚTIL	1.007,40m2
TOTAL CONSTRUIDA	1.114,96 m2

Tabla 3.1: Superficies útiles del C-Ddi del SP4 según su diseño original.

3.2.2. PROYECTO MODIFICADO

A partir del proyecto original del C-Ddl se realizaron evaluaciones energéticas mediante modelos de simulación con el fin de optimizar su comportamiento, dentro del subproyecto 1 del PSE-ARFRISOL. En dichos trabajos participó el autor de la presente Memoria, junto a otras compañeras de la Unidad de Investigación sobre Eficiencia Energética en la Edificación. Dicho trabajo quedó reflejado en un informe final común al subproyecto 1 del PSE-ARFRISOL. A continuación se resumen los hechos más relevantes que conciernen a esta investigación.

A partir de un año de datos meteorológicos generado por los investigadores de recursos solares de la PSA se analizaron en primer lugar las estrategias bioclimáticas que sugería la carta bioclimática de Givoni. Dicho diagrama de Givoni se muestra en la figura 3.4.

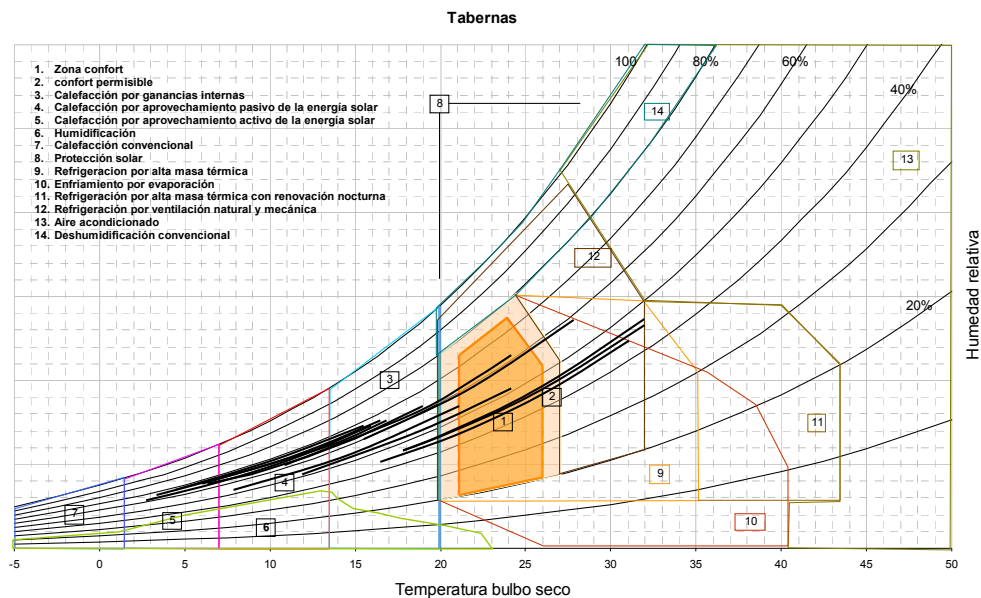


Figura 3.4. Diagrama de Givoni para los datos meteorológicos de la PSA.

Del análisis del diagrama se concluye que las estrategias más efectivas, divididas por estaciones, serán:

En invierno:

- Cerramientos exteriores con elevada masa térmica y alto nivel de aislamiento.
- Grandes aperturas al sur que potencien las ganancias solares y pequeños huecos a norte que reduzcan las pérdidas.
- Disminución de las infiltraciones mediante la utilización de vidrios dobles en carpintería con rotura de puente térmico.

En verano:

- Ventilación natural cruzada.
- Enfriamiento evaporativo.
- Disminución de las infiltraciones mediante la utilización de vidrios dobles en carpintería con rotura de puente térmico..
- Sombreamientos en fachada sur y en cubierta.

A partir del proyecto original del C-Ddl se procedió a la simulación del mismo con el fin de optimizar su comportamiento energético. Para ello se emplearon diferentes softwares de simulación dinámica del comportamiento energético de edificaciones, principalmente TRNSYS 16 y DOE-2 .

Para dichas simulaciones, el C-Ddl se dividió en diez zonas térmicas, atendiendo a criterios de climatización, uso de las diferentes estancias y diferente exposición a las condiciones de contorno. La zonificación térmica para la creación del modelo de simulación se presenta en la figura 3.5.



Figura 3.5. Zonificación térmica del CDdl de la PSA para su simulación dinámica térmica.

Asimismo, la ocupación del C-Ddl se presupone igual a la especificada en las funcionalidades del diseño original del C-Ddl y se muestra en la tabla 3.2. Se distinguen dos horarios diferentes: uno para iluminación y otro para ocupación y equipamiento eléctrico como ordenadores. Se presupone, asimismo, que el equipamiento eléctrico asociado se encuentra en funcionamiento simultáneamente con la ocupación. De lunes a viernes se supone una ocupación del 100% en personal y equipos informáticos de 8 a 17 horas, ambos inclusive. El horario de ocupación de la sala de reuniones se ha considerado igual al horario de iluminación para tener en cuenta los efectos de ocupación esporádica. En cuanto a los horarios de iluminación se realiza una distinción entre las épocas de verano y de invierno, ésta última con mayores necesidades de iluminación artificial. Se ha tomado la época de verano desde el 1 de abril hasta el 30 de septiembre y en esa época la carga de iluminación es del 20% durante las horas de ocupación. El período de invierno, desde el 1 de octubre al 30 de marzo, se caracteriza por un mayor uso de la iluminación artificial que se modeliza aumentando hasta el 80% en las primeras dos horas de la mañana y la última de la tarde, puesto que el sol sale más tarde y durante las primeras

horas la luz natural no es suficiente, y por la tarde el sol se pone antes, mientras que el resto de las horas de trabajo se mantiene igual que en verano, al 20 % de la ganancia nominal, porque habrá algunas luces encendidas durante todo el día (zonas mal iluminadas, personas que olvidan apagar las luces, etc.).

Con estos datos, en el seno del Subproyecto 1 del PSE-ARFRISOL se propuso una modificación al proyecto arquitectónico original del C-DdI. Dicha modificación consistió en una pérgola de doble inclinación captadora-emisora como sustitución de la estructura de apoyo de la instalación solar mediante caballetes inclinados 45°. Se trata de una estructura en forma de alas, que recorre el C-DdI longitudinalmente, aprovechando la mayor altura proyectada para el pasillo principal, e integrando las estrategias pasivas sugeridas por los análisis climáticos.

Nº	DESCRIPCIÓN	ÁREA (m ²)	Ocupac. máx. (pers.)	Gan. Int. sensible (W/pers)	Gan. Int. latente (W/pers)	Gan. totales (W/pers)	Gan. Int. Ilumin. (W/m ²)	Gan. Equipos (W)	Otras gan. (W)	Ocupación
1	Despch Oeste	34,73	4	75	75	600	5	920		Horario PCs
2	Despch O	124,59	13	75	75	600	5	2990		Horario PCs
3	Despch E	124,28	13	75	75	600	5	2990		Horario PCs
4	Despch Este	34,73	4	75	75	600	5	920		Horario PCs
5	Comedor	26,63				0	5			
6	Sala Becarios	57,94	12	75	75	600	5	2760		Horario PCs
7	Usos comunes	80,45				0	5	1050	1000	Horario PCs
8	Vestibulo	62,16				0	5			
9	Sala Reunion	51,675	2	65	55	480	5			Horario iluminación
10	Sala Actos	87,02				0	5			
11	Recepción	45,16	1	65	55	480	5			Horario PCs

Tabla 3.2. Ocupación supuesta para las personas del C-DdI.

La inclinación de las alas de la doble pérgola debían ser diseñadas de modo que actuaran como elementos de sombreado total de la cubierta para los meses de verano, dejando paso a la radiación solar durante los meses de invierno. La doble pérgola ha sido concebida para que sobre cada una de las alas se albergue un tipo distinto de captadores: captadores solares térmicos para producción de agua caliente para calefacción y refrigeración solar, y captadores sin la capa de vidrio que actuarán como radiadores nocturnos de refrigeración pasiva. También serviría para ocultar e integrar las distintas chimeneas solares de los despachos que favorecerán la ventilación cruzada. La figura 3.6 muestra un esquema de diseño de la pérgola de doble inclinación captadora-emisora y fotografías de ella una vez construida.

Se propuso una estrategia de acondicionamiento basada en la combinación del funcionamiento nocturno de una chimenea solar y el uso del suelo radiante para distribuir el agua enfriada en los paneles radiativos albergados en la pérgola. El objetivo principal de esta estrategia nocturna

combinada es el enfriamiento de la estructura de la edificación por ventilación inducida potenciando a la vez el funcionamiento del suelo radiante, para retrasar así la llegada de la onda de calor al edificio durante el día.

Adicionalmente, se realizaron baterías de simulaciones del comportamiento térmico del C-DdI con el objetivo de analizar a qué parámetros era más sensible y apoyar las decisiones relativas al diseño final. Concretamente, se realizaron simulaciones de diferentes composiciones de la parte ciega de la fachada, del efecto de los sombreamientos sobre la cubierta, de la temperatura del terreno sobre el que se asienta el C-DdI y del tipo de vidrio elegido.

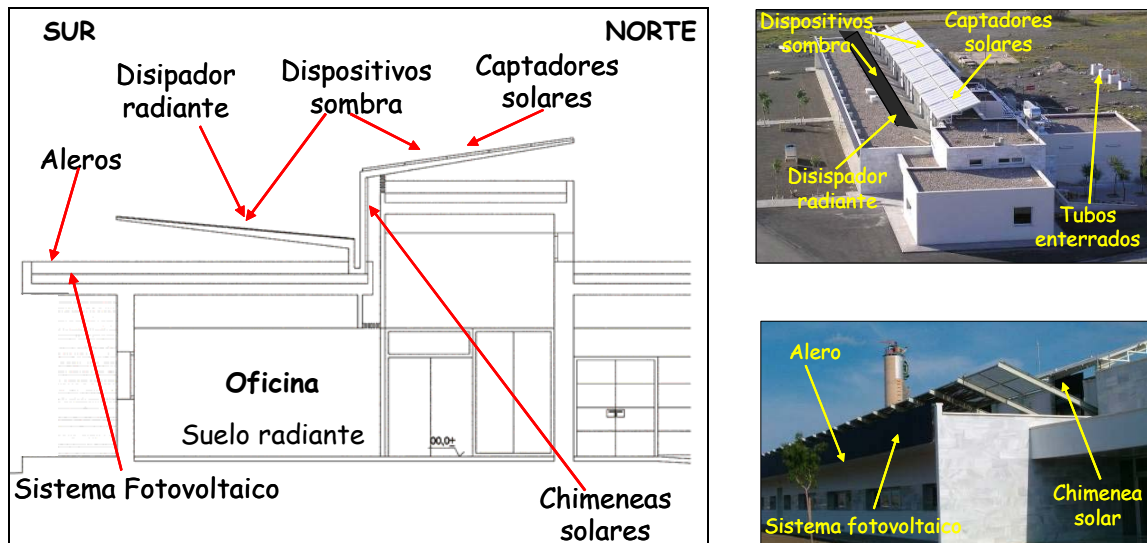


Figura 3.6. Esquema y vistas del C-DdI de la PSA.

Finalmente se dispuso colocar vidrios dobles con rotura de punete térmico para cubrir los huecos de fachada. La selección final fue Climalit con dos lunas, la exterior incolora de 6 mm y la interior de baja emisividad Planytherm de 6 mm, cámara de aire de 6 mm colocado sobre aluminio y sellado con silicona incolora. Todos los huecos, tanto a norte como a sur fueron cubiertos con estas vidrieras.

En adición, los sistemas solares activos incluyeron la producción de frío solar mediante máquinas de absorción, conductos enterrados para pretratamiento del aire de ventilación, Unidades de Tratamiento de Aire (UTA's) con recuperadores de calor entálpicos y un sistema convencional de apoyo. El sistema convencional de apoyo consiste en una bomba de calor agua-agua conectada a un sistema geotérmico de sondeos verticales para aumentar su eficiencia.

El modelo de simulación empleado en la asistencia al diseño fue modificado para su empleo en el diseño experimental del C-DdI. Dicho modelo se describe en la siguiente sección.

3.2.3. MODELO DE SIMULACIÓN PARA EL DISEÑO EXPERIMENTAL.

El modelo de simulación implementado para el diseño experimental se restringió a una de las estancias, con el objetivo de proceder a la calibración, validación y/o ajuste del modelo en un entorno lo más controlado posible. Este método permite una gestión más adecuada de los recursos, pues el número de sensores a instalar es considerable y una monitorización exhaustiva de cada uno de los despachos se consideró fuera de lugar, tanto por motivos económicos como de personal asociado al mantenimiento de la instalación.

Las hipótesis del nuevo modelo deben permitir, asimismo, evaluar las hipótesis generales empleadas en el modelo de simulación original. A continuación se describen dichas hipótesis:

- Se emplea el mismo conjunto de datos meteorológicos que en el modelo de simulación empleado en la asistencia al diseño.
- Para la estimación de la irradiancia solar sobre orientaciones arbitrarias se emplean correlaciones a partir de la irradiancia global sobre la horizontal (Reindl, 1990a; Reindl, 1990b). El valor de la reflectancia hemisférica del terreno se ha tomado igual a 0.2, según las especificaciones del Código Técnico de la Edificación español [CTE, 2006].
- Para la estimación de la temperatura de la bóveda celeste se emplean las correlaciones habituales (Martin, 1984) con el cálculo asociado del factor de cobertura celeste (Kasten, 1980).
- Las dimensiones del recinto se han tomado iguales a las de un despacho típico orientado al sur y sus tabiques interiores adiabáticos.
- Las propiedades termofísicas de los materiales empleados en los diferentes componentes constructivos del C-Ddi de la PSA se han tomado de la Norma Básica de Edificación (NBE-79) y se muestran en la tabla 3.3.
- La tasa de infiltraciones del C-Ddi se ha supuesto constante e igual a 0.6 renovaciones por hora, tal y como sugiere la literatura [ASHRAE, 1997].
- El coeficiente h_c ($W/m^2 K$) de transferencia de calor convectivo de la superficie del cerramiento se ha colocado en función de velocidad del viento v (m/s), tal como indica la siguiente ecuación [Duffie y Beckman, 1991]:
- $h_c = 2.8 + 3.2 v$.
- Los sobreamientos de las ventanas se han introducido como un voladizo situado a una altura de 1.21 m desde la parte superior de la ventana, cuya proyección en horizontal mide 2 m y que se extiende lateralmente hasta 5 m desde los laterales de las ventanas.

Con este conjunto de hipótesis se procede a la simulación del C-Ddi en evolución libre para el diseño experimental. El procedimiento se describe en la siguiente sección.

MATERIAL	Espesor (cm)	Resistencia (m ² K/W)	Conductividad térmica (kJ/hmK)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kgK)
CERRAMIENTO EXTERIOR					
Yeso	1		1.08	900	1000
Ladrillo Hueco	7		1.764	1200	900
Poliuretano Proyectado	4		0.144	12	1800
Cámara de Aire 5cm	5	0.18			
Ladrillo Hueco	14		1.764	1200	900
Mortero MON	1		5.04	2000	1100
SOLERA					
Gres (Plaqueta Cerámica)	2.5		3.78	2000	1200
Mortero (Encachado)	4		5.04	2000	1100
Arena de Nivelación	3.5		7.2	2000	1000
Hormigón Armado	15		8.28	2300	1000
Grava Rodada	20		2.916	1700	900
CUBIERTA					
Bovedilla Hormigón	24		3.744	1500	1000
Mortero MON	14		5.04	2000	1100
Betún Filtro	0.5		0.828	1100	1000
Poliestireno	4		0.144	25	1500
Polipropileno	0.3		0.792	910	1800
Grava Rodada	6		2.916	1700	900
Hormigón Armado	10		8.28	2300	1000
PARTICIONES INTERIORES					
Yeso02 UNE	1		1.08	900	1000
Ladrillo Hueco	10		1.764	1200	900
Yeso02 UNE	1		1.08	900	1000

Tabla 3.3. Características termofísicas de los diferentes componentes constructivos del CDdl de la PSA empleados en el modelo de simulación de asistencia al diseño experimental.

3.3. DISEÑO EXPERIMENTAL DEL C-Ddl.

En esta sección se describe la metodología empleada en el diseño experimental. El análisis presentado en esta sección se basa en trabajos previos (IEA-SHC task 22), en los que se incluyen modificaciones para alcanzar el objetivo. El objetivo del diseño experimental debe permitir la calibración, validación y/o ajuste del modelo de simulación empleado en evolución libre. Para ello, se deben identificar en primer lugar, de entre todos los parámetros susceptibles de variación en el modelo, aquellos que son activos con respecto a una variable de respuesta determinada. Los parámetros activos serán los únicos con los que se podrá comprobar el modelo. Esta identificación requiere, como paso previo, la realización de un análisis de sensibilidad del modelo. Asimismo, requiere de la definición de una función de medida de la actividad del parámetro. En este trabajo se realizan definiciones originales de la medida de actividad de los parámetros, con respecto a trabajos previos. El análisis se aplica a la temperatura del aire del interior del recinto como salida del modelo.

Acto seguido, se analiza la correlación entre los parámetros activos identificados, puesto que si dos parámetros activos presentan correlación en la respuesta del modelo sólo se puede ajustar una determinada combinación lineal de ellos.

Para evitar este fenómeno se procede, en primer lugar, a un agrupamiento basado en las propiedades físicas del sistema, demostrándose que esa técnica por sí sola es insuficiente para resolver las correlaciones presentes. En este caso en estudios previos se procede al agrupamiento óptimo basado en técnicas matemáticas como el análisis de componentes principales (Palomo, 2002). En este trabajo se realiza una aproximación diferente al mismo problema: considerando el caso de un experimento multisalida para resolver las correlaciones entre parámetros activos del modelo. Esta técnica ha sido empleada con éxito en ocasiones anteriores en el mismo grupo de trabajo (Jiménez, 2005).

Como variables adicionales de salida se seleccionan la temperatura de la superficie interior del vidrio y la temperatura de la superficie del suelo de la estancia considerada, demostrándose que en ese caso se pueden resolver las correlaciones presentes entre parámetros.

3.3.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD E IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS ACTIVOS. DESCRIPCIÓN DE LAS HIPÓTESIS DE SIMULACIÓN.

El análisis de sensibilidad pretende analizar el efecto de las variaciones de los parámetros sobre el comportamiento de un sistema. Se trata de un tipo de análisis muy extendido en las diferentes ramas de la ciencia y que ha sido ampliamente empleado en la evaluación energética de edificaciones (Lam, 1996; Lomas, 1992). Dentro del amplio campo que representa se pueden distinguir dos grandes familias de métodos para el análisis de sensibilidad: los deterministas y los estocásticos.

El análisis de sensibilidad diferencial forma parte del primer grupo. Se basa en el estudio de la primera derivada de la respuesta del modelo con respecto a sus parámetros. En ese esquema, se define la sensibilidad de la respuesta del modelo $y(t)$ al parámetro θ_i mediante la expresión:

$$S(t) \equiv \frac{\partial y(t)}{\partial \theta_i}, \text{ (ec. 3.1)}$$

Que proporciona una estimación de primer orden del efecto de la variación de los parámetros sobre la respuesta del modelo. En función de la complejidad del modelo dichas derivadas se calculan de una forma aproximada o exacta. En el primer caso se habla de métodos de perturbación de parámetros y en el segundo de métodos de la ecuación de sensibilidad. En nuestro caso de estudio emplearemos el método de la perturbación de parámetros, en el que se define la sensibilidad como:

$$S(t) \equiv \frac{\partial y(t)}{\partial \theta_i} \approx \frac{y(t; \theta_i) - y(t; \theta_i \pm \Delta \theta_i)}{\Delta \theta_i}, \text{ (ec. 3.2)}$$

Donde θ_i representa el valor nominal del i-ésimo parámetro y $\Delta \theta_i$ representa una pequeña perturbación en torno al valor nominal. De este modo, el método de la perturbación de

parámetros se basa en escoger un conjunto nominal de parámetros y evaluar la diferencia producida por la variación de cada uno de ellos por separado.

El modelo de simulación consta de parámetros que se pueden clasificar en cuatro grupos:

1. Geometría del sistema. Aquí se incluyen las diferentes dimensiones espaciales del recinto seleccionado, la posición y dimensión de los elementos semitransparentes, la geometría de los sombreamientos y los diferentes espesores de las diferentes capas de los materiales de los que están compuestos los elementos constructivos.
2. Propiedades termofísicas y ópticas de cada uno de los materiales empleados en la construcción. Dentro de esta categoría se incluyen la capacidad calorífica, la densidad y la conductividad térmica de cada uno de los materiales empleados en la definición del modelo de simulación. Asimismo, la absorptividad, emisividad e índice de transparencia medios también forman parte de este grupo.
3. Condiciones de contorno indefinidas. La simulación se realiza con los valores obtenidos de un Año Meteorológico Tipo, que no incluye las características del terreno. Las características necesarias son la reflectancia hemisférica del terreno y la temperatura del mismo en función de la profundidad.
4. Otros aspectos físicos relevantes en la evolución temporal de la temperatura del aire interior. En este grupo se incluyen los coeficientes de convección de cada una de las superficies (tanto interiores como exteriores) en contacto con el aire, la tasa de infiltraciones, o la inercia térmica del interior de la estancia.

En nuestro caso de estudio, según la tabla 3.3 de la sección anterior, **se dispone de un total de 132 parámetros**, 76 de ellos referentes a las propiedades termofísicas (conductividad térmica, densidad y capacidad calorífica) de los componentes constructivos del C-DdI (considerando la cámara de aire de la fachada como un elemento de capacidad calorífica despreciable), 31 geométricos (diferentes dimensiones de la estancia, longitud del peto de sombreamiento y espesores de las diferentes capas de los materiales que componen en C-DdI), 24 referentes a aspectos físicos relevantes para evolución temporal del sistema (coeficientes de convección y de absorción de cada una de las superficies en contacto con el aire interior y exterior, inercia térmica y tasa de infiltraciones) y 1 referido a las condiciones de contorno no disponibles (temperatura del terreno bajo el edificio).

No obstante, no todos esos parámetros son igualmente influyentes en el comportamiento energético, puesto que se han incluido las capas de impermeabilizante y otros materiales de espesor despreciable. Asimismo, otros parámetros como las dimensiones de la estancia son directamente accesibles y se pueden conocer con precisión arbitraria, por lo que no se tienen en cuenta en el análisis de sensibilidad. Tras eliminar este tipo de parámetros, el número total se reduce a 41. La tabla 3.4 resume los parámetros físicos de interés para el análisis de sensibilidad.

	Parámetro	número	μ_{aire}	σ_{aire}
Fachada sur	Lad. hueco interior conductividad	1	0.02	0.02
	Lad. hueco interior capacidad	2	0.00	0.03
	Lad. hueco interior densidad	3	0.00	0.03
	Poliuretano proyectado espesor	4	-0.14	0.06
	Poliuretano proyectado conductividad	5	0.14	0.06
	Poliuretano proyectado capacidad	6	0.00	0.00
	Poliuretano proyectado densidad	7	0.00	0.00
	Lad. hueco exterior conductividad	8	0.04	0.03
	Lad. hueco exterior capacidad	9	0.00	0.04
	Lad. hueco exterior densidad	10	0.00	0.04
	Convección interior	11	0.02	0.01
	Convección exterior	12	-0.12	0.04
	Absortividad interior	13	0.01	0.00
	Absortividad exterior	14	0.31	0.08
Suelo	Hormigón suelo conductividad	15	-0.50	0.28
	Hormigón suelo capacidad	16	0.00	0.01
	Hormigón suelo densidad	17	0.00	0.01
	Arena nivelación espesor	18	0.31	0.17
	Arena nivelación conductividad	19	-0.69	0.39
	Arena nivelación capacidad	20	0.00	0.03
	Arena nivelación densidad	21	0.00	0.03
	Absortividad interior	22	-0.01	0.01
	Convección interior	23	-0.52	0.33
Cubierta	Hormigón armado conductividad	24	0.05	0.04
	Hormigón armado capacidad	25	0.01	0.05
	Hormigón armado densidad	26	0.01	0.05
	Mortero monocapa espesor	27	-0.05	0.13
	Mortero monocapa conductividad	28	0.07	0.05
	Mortero monocapa capacidad	29	0.01	0.11
	Mortero monocapa densidad	30	0.01	0.11
	Poliestireno espesor	31	-0.61	0.45
	Poliestireno conductividad	32	0.05	0.04
	Poliestireno capacidad	33	0.00	0.00
	Poliestireno densidad	34	0.00	0.00
	Convección interior	35	0.08	0.05
	Convección exterior	36	-0.45	0.18
	Absortividad interior	37	0.02	0.01
	Absortividad exterior	38	1.09	0.37
Otros	Inercia	39	-0.04	0.07
	Infiltra	40	-0.03	0.45
	Tterreno	41	10.01	0.41

Tabla 3.4. Parámetros μ -activos y σ -activos (en verde) con respecto a la temperatura del aire

El análisis de sensibilidad resulta útil para conocer el número de parámetros activos del modelo. Se denomina parámetro activo del modelo a aquel cuya variación produce una variación significativa en la respuesta del modelo. Para su análisis resulta conveniente definir la sensibilidad reducida (Palomo, 2003):

$$\tilde{s}_i(t) \equiv \frac{\partial y(t)}{\partial \theta_i / \theta_i} = \theta_i s_i(t) . \text{ (ec. 3.3)}$$

Una vez que se dispone de las series temporales de sensibilidades reducidas a cada uno de los parámetros del modelo se pueden identificar los parámetros activos del mismo. La actividad de un parámetro, no obstante, es función de la medida que se emplee para definirlo. Las medidas más comunes para identificar la actividad de un parámetro son el primer y el segundo momentos de la distribución temporal de sensibilidades reducidas.

El primer momento, μ_i , se asocia con las características estáticas del sistema y se define mediante la expresión:

$$\mu_i = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \tilde{s}_i(t) \text{ (ec. 3.4)}$$

El segundo momento, σ_i , se asocia con las características dinámicas del sistema y se define mediante la expresión:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N (\tilde{s}_i(t) - \mu_i)^2} \text{ (ec. 3.5)}$$

En trabajos previos (Palomo, 2003) se define, para cada parámetro, una distancia igual a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados del primer y el segundo momento. Se dice, entonces que un parámetro es activo si supera un determinado umbral. Dicho umbral es igual al porcentaje de variación aplicado al análisis de sensibilidad (Palomo, 2004), que se toma igual a 0.1. En este trabajo se toma el mismo porcentaje de variación para el análisis de sensibilidad.

Sin embargo, pese a que los porcentajes de variación son los mismos, la aproximación que se toma es diferente. Dado que la actividad de un parámetro es función de la medida tomada, es posible que tomar varias medidas discrimine entre parámetros diferentes. Esto puede ser de utilidad en el caso de que el modelo empleado en la estimación teórica no se ajuste a los datos experimentales y haya que proceder a la estimación de sus parámetros libres para la validez. Como se verá más adelante, este hecho es un pilar fundamental de la aproximación realizada para el diseño experimental y la validación del modelo, pues permitirá resolver correlaciones entre los parámetros del modelo. Es conveniente destacar en este punto que este método ha sido aplicado con éxito dentro del mismo grupo de investigación en ámbitos distintos, como es el de la identificación de parámetros constructivos de componentes y edificaciones mediante modelos en función de transferencia (Jiménez, 2009; Porcar, 2008).

En este trabajo, se realizan las siguientes definiciones originales y nueva basandose en los conocimientos anteriores:

* Se dice que un parámetro θ_i es μ -activo si $\mu_i > 0.1$.

* Se dice que un parámetro θ_i es σ -activo si $\sigma_i > 0.1$.

Mediante esta aproximación se realiza el análisis de sensibilidad del modelo en evolución libre, con la temperatura del interior de la estancia como respuesta del modelo y con una variación de los parámetros igual a 0.1. En la tabla 3.4 se presentan los parámetros σ -activos y los μ -activos destacados en verde. Se puede comprobar a simple vista que hay parámetros que son activos en la media y no en la varianza y viceversa. Es conveniente destacar en este punto que solamente los parámetros activos del modelo pueden ser ensayados y comprobados en esta aproximación. No obstante, los parámetros inactivos del modelo no producen un efecto significativo sobre la respuesta del modelo.

3.3.2. ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS ACTIVOS.

Para la comprobación de la validez de un modelo es una condición necesaria conocer los parámetros activos del sistema, pero no es una condición suficiente. Los parámetros activos pueden presentar correlación, lo que significa que la variación de parámetros diferentes produce la misma variación en la respuesta del modelo. Este aspecto puede ser problemático en el caso de que el modelo teórico no se ajuste lo suficientemente bien a los datos experimentales, ya que no habría manera de distinguir entre los efectos de varios parámetros activos y, por tanto, no existiría un diagnóstico sobre qué efecto corregir.

Para estimar la correlación entre parámetros activos se calcula la cantidad mediante la expresión:

$$\rho_{ij} = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\tilde{s}_i - \mu_i)(\tilde{s}_j - \mu_j)}{\sigma_i \sigma_j} \quad (\text{ec 3.6})$$

Y, siguiendo estudios previos, se comprueba que su valor absoluto es mayor que 0.8 (Palomo, 2004). La tabla 3.5 muestra la correlación presente entre los parámetros activos (en la media o en la varianza) con respecto a la temperatura del aire. Los parámetros que están correlacionados aparecen destacados en verde.

Se puede observar que algunos de ellos están correlacionados entre sí. Los parámetros del aislamiento de la fachada exterior se encuentran correlacionados. Los parámetros referentes al suelo se correlan entre sí, con otros pertenecientes a la cubierta y con respecto a la infiltración. Una manera de reducir el número de parámetros acoplados consiste en realizar agrupamientos basados en las propiedades físicas del sistema desde un punto de vista macroscópico. Se buscan grupos de parámetros que representen el mismo fenómeno físico y se escoge un

representante de cada grupo. Se puede observar que la variación del espesor de la capa de poliuretano proyectado está correlada con la conductividad y, asimismo, ambas se relacionan con la resistencia térmica del componente, con lo que basta escoger uno de los dos parámetros. La misma situación se presenta entre los parámetros del suelo. Los parámetros del mortero de la cubierta hacen referencia a la capacidad calorífica, con lo que se pueden agrupar en uno.

	Aire	4	5	12	14	15	18	19	23	27	29	30	31	36	38	40	41
Poliuretano proyectado espesor	4	1.00	-1.00	-0.06	-0.24	0.60	-0.59	0.61	0.60	0.49	0.43	0.43	0.46	0.11	-0.25	-0.61	-0.19
Poliuretano proyectado conductividad	5	-1.00	1.00	0.05	0.24	-0.60	0.59	-0.61	-0.60	-0.50	-0.43	-0.43	-0.46	-0.10	0.25	0.61	0.19
Convección exterior	12	-0.06	0.05	1.00	-0.78	-0.53	0.53	-0.53	-0.54	-0.22	-0.08	-0.08	-0.58	-0.56	0.54	0.57	-0.12
Absortividad exterior	14	-0.24	0.24	-0.78	1.00	0.55	-0.56	0.55	0.57	0.18	-0.04	-0.04	0.64	0.67	-0.63	-0.52	0.16
Hormigón suelo conductividad	15	0.60	-0.60	-0.53	0.55	1.00	-1.00	1.00	0.99	0.43	0.16	0.16	0.92	0.70	-0.75	-0.86	0.01
Arena nivelación espesor	18	-0.59	0.59	0.53	-0.56	-1.00	1.00	-1.00	-0.99	-0.43	-0.15	-0.15	-0.92	-0.69	0.74	0.85	-0.05
Arena nivelación conductividad	19	0.61	-0.61	-0.53	0.55	1.00	-1.00	1.00	1.00	0.45	0.18	0.18	0.93	0.71	-0.76	-0.88	-0.02
Convección front	23	0.60	-0.60	-0.54	0.57	0.99	-0.99	1.00	1.00	0.47	0.20	0.20	0.93	0.71	-0.78	-0.92	-0.04
Mortero monocapa espesor	27	0.49	-0.50	-0.22	0.18	0.43	-0.43	0.45	0.47	1.00	0.95	0.95	0.58	0.24	-0.51	-0.55	-0.18
Mortero monocapa capacidad	29	0.43	-0.43	-0.08	-0.04	0.16	-0.15	0.18	0.20	0.95	1.00	1.00	0.30	-0.03	-0.25	-0.34	-0.16
Mortero monocapa densidad	30	0.43	-0.43	-0.08	-0.04	0.16	-0.15	0.18	0.20	0.95	1.00	1.00	0.30	-0.03	-0.25	-0.34	-0.16
Poliestireno espesor	31	0.46	-0.46	-0.58	0.64	0.92	-0.92	0.93	0.93	0.58	0.30	0.30	1.00	0.86	-0.93	-0.83	-0.15
Convección exterior	36	0.11	-0.10	-0.56	0.67	0.70	-0.69	0.71	0.71	0.24	-0.03	-0.03	0.86	1.00	-0.95	-0.58	-0.19
Absortividad exterior	38	-0.25	0.25	0.54	-0.63	-0.75	0.74	-0.76	-0.78	-0.51	-0.25	-0.25	-0.93	-0.95	1.00	0.68	0.25
Infiltra	40	-0.61	0.61	0.57	-0.52	-0.86	0.85	-0.88	-0.92	-0.55	-0.34	-0.34	-0.83	-0.58	0.68	1.00	0.14
Tterreno	41	-0.19	0.19	-0.12	0.16	0.01	-0.05	-0.02	-0.04	-0.18	-0.16	-0.16	-0.15	-0.19	0.25	0.14	1.00

Tabla 3.5. Correlación entre los parámetros activos con respecto a la temperatura del aire.

Tras realizar este agrupamiento basado en las propiedades físicas del sistema, la correlación entre parámetros se muestran en las tablas 3.6 y 3.7, donde se ha hecho la distinción entre parámetros μ -activos y σ -activos.

Agrupamiento físico	μ_{aire}	5	12	14	15	31	36	38	40	41
Poliuretano proyectado conductividad	5	1.00	0.05	0.24	-0.60	-0.46	-0.10	0.25	0.61	0.19
Convección exterior	12	0.05	1.00	-0.78	-0.53	-0.58	-0.56	0.54	0.57	-0.12
Absortividad exterior	14	0.24	-0.78	1.00	0.55	0.64	0.67	-0.63	-0.52	0.16
Hormigón suelo conductividad	15	-0.60	-0.53	0.55	1.00	0.92	0.70	-0.75	-0.86	0.01
Poliestireno espesor	31	-0.46	-0.58	0.64	0.92	1.00	0.86	-0.93	-0.83	-0.15
Convección exterior	36	-0.10	-0.56	0.67	0.70	0.86	1.00	-0.95	-0.58	-0.19
Absortividad exterior	38	0.25	0.54	-0.63	-0.75	-0.93	-0.95	1.00	0.68	0.25
Infiltra	40	0.61	0.57	-0.52	-0.86	-0.83	-0.58	0.68	1.00	0.14
Tterreno	41	0.19	-0.12	0.16	0.01	-0.15	-0.19	0.25	0.14	1.00

Tabla 3.6. Correlación entre los parámetros μ -activos con respecto a la temperatura del aire tras agrupamiento físico.

Agrupamiento físico	σ_{aire}	15	27	31	36	38	40	41
Hormigón suelo conductividad	15	1.00	0.43	0.92	0.70	-0.75	-0.86	0.01
Mortero monocapa espesor	27	0.43	1.00	0.58	0.24	-0.51	-0.55	-0.18
Poliestireno espesor	31	0.92	0.58	1.00	0.86	-0.93	-0.83	-0.15
Convección exterior	36	0.70	0.24	0.86	1.00	-0.95	-0.58	-0.19
Absortividad exterior	38	-0.75	-0.51	-0.93	-0.95	1.00	0.68	0.25
Infiltra	40	-0.86	-0.55	-0.83	-0.58	0.68	1.00	0.14
Tterreno	41	0.01	-0.18	-0.15	-0.19	0.25	0.14	1.00

Tabla 3.7. Correlación entre los parámetros σ -activos con respecto a la temperatura del aire tras agrupamiento físico.

Debido a que se dispone de dos medidas (los dos primeros momentos de la distribución de sensibilidades reducidas) el máximo número de parámetros acoplados que se puede resolver es dos. Así, si sólo se mide la temperatura del aire en el interior del recinto no se pueden

desacoplar los efectos de los diferentes parámetros involucrados en la evolución temporal del sistema. Bajo esas condiciones y en caso de que el modelo no ajuste no se puede identificar un parámetro como responsable, sólo una combinación de ellos. En trabajos previos (Palomo, 2003; Palomo, 2004) esta combinación se escoge mediante un análisis de componentes principales que asegure la combinación óptima. Sin embargo, si lo que se pretende es obtener cada uno de los parámetros del modelo de forma unívoca esa aproximación no resulta útil.

Por ello, en este trabajo se propone un método alternativo basado en un diseño experimental multisalida y que se describe en la siguiente sección.

3.3.3. PROPUESTA DE UN EXPERIMENTO MULTISALIDA. SELECCIÓN DE MEDIDAS.

Como se ha comentado con anterioridad, en trabajos previos (Jiménez, 2005) se ha empleado la técnica de la salida múltiple en el contexto de los modelos en función de transferencia para evitar las correlaciones entre los parámetros implicados. El hecho de añadir variables al estudio puede añadir más ecuaciones de balance térmico que permitan resolver la correlación entre los diferentes parámetros activos pertenecientes a fenómenos físicos diferentes y presentes en la correlación. Por otra parte, puede que añadir una nueva variable añada nuevos parámetros activos al estudio y que éstos se encontraran a su vez correlados con los anteriores, lo que impediría el éxito del estudio. Por ello, hay que repetir el estudio completo para cada nueva variable de salida que se incluye en el estudio. Además, el balance térmico que se añada ha de revestir una cierta importancia con respecto a la información que aporte a las incertidumbres presentes en el modelo. Por ello, se seleccionan la temperatura del vidrio y la temperatura de la superficie del suelo. La primera de ellas discrimina flujos de calor entre la parte opaca y de inercia del cerramiento y la semitransparente sin inercia del mismo. La temperatura de la superficie del suelo permite añadir información sobre la influencia relativa del intercambio de calor con el terreno subyacente al C-DdI. Asimismo, dado que se dispone de un suelo radiante, puede ofrecer información relevante con respecto al buen funcionamiento de este sistema de distribución de calor. En la tabla 3.8 se muestran los resultados del análisis de parámetros activos para las variables seleccionadas, tanto en el primer como en el segundo momento de la serie de sensibilidades reducidas.

Se puede comprobar, en primer lugar, que la introducción de las nuevas variables no activa ningún parámetro adicional. De hecho, logra desactivar algunos de ellos, como es el coeficiente de convección interior del suelo en el caso de la temperatura de la superficie del suelo o los términos capacitivos de la cubierta y los resistivos de la fachada, tanto para la temperatura de la superficie del vidrio como para la temperatura de la superficie del suelo.

Las tablas 3.9. a 3.12 muestran en verde los resultados para las correlaciones entre los parámetros μ -activos y σ -activos para las temperaturas de superficie tanto del vidrio como del suelo, después de realizar el agrupamiento basado en los fenómenos físicos.

Se puede observar que no aparecen correlaciones distintas a las ya existentes entre los diferentes parámetros activos. El número de correlaciones máximo entre diferentes parámetros activos es cinco, con lo que 6 restricciones pueden, en principio, resolver las ambigüedades existentes entre diferentes parámetros cuya variación produce variaciones similares en la respuesta del modelo. Es conveniente notar en este punto que tanto la temperatura del terreno bajo del C-DdI como la tasa de infiltraciones se han supuesto constantes, siendo su medida más que conveniente.

	Parámetro	número	μ_{aire}	σ_{aire}	μ_{vidrio}	σ_{vidrio}	μ_{suelo}	σ_{suelo}
Fachada sur	Lad. hueco interior conductividad	1	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
	Lad. hueco interior capacidad	2	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.02
	Lad. hueco interior densidad	3	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.02
	Poliuretano proyectado espesor	4	-0.14	0.06	-0.09	0.04	-0.08	0.03
	Poliuretano proyectado conductividad	5	0.14	0.06	0.09	0.04	0.08	0.03
	Poliuretano proyectado capacidad	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Poliuretano proyectado densidad	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Lad. hueco exterior conductividad	8	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02
	Lad. hueco exterior capacidad	9	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	0.02
	Lad. hueco exterior densidad	10	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	0.02
	Convección interior	11	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
	Convección exterior	12	-0.12	0.04	-0.08	0.02	-0.07	0.02
	Absortividad interior	13	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
	Absortividad exterior	14	0.31	0.08	0.21	0.06	0.18	0.05
Suelo	Hormigón suelo conductividad	15	-0.50	0.28	-0.34	0.19	-0.58	0.33
	Hormigón suelo capacidad	16	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
	Hormigón suelo densidad	17	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
	Arena nivelación espesor	18	0.31	0.17	0.21	0.12	0.36	0.20
	Arena nivelación conductividad	19	-0.69	0.39	-0.47	0.26	-0.80	0.45
	Arena nivelación capacidad	20	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.06
	Arena nivelación densidad	21	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.06
	Absortividad interior	22	-0.01	0.01	-0.01	0.01	0.02	0.03
	Convección interior	23	-0.52	0.33	-0.35	0.21	0.10	0.08
Cubierta	Hormigón armado conductividad	24	0.05	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02
	Hormigón armado capacidad	25	0.01	0.05	0.00	0.03	0.00	0.03
	Hormigón armado densidad	26	0.01	0.05	0.00	0.03	0.00	0.03
	Mortero monocapa espesor	27	-0.05	0.13	-0.03	0.09	-0.03	0.08
	Mortero monocapa conductividad	28	0.07	0.05	0.05	0.03	0.04	0.03
	Mortero monocapa capacidad	29	0.01	0.11	0.01	0.07	0.01	0.06
	Mortero monocapa densidad	30	0.01	0.11	0.01	0.07	0.01	0.06
	Poliestireno espesor	31	-0.61	0.45	-0.41	0.30	-0.36	0.27
	Poliestireno conductividad	32	0.05	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02
	Poliestireno capacidad	33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Poliestireno densidad	34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Convección interior	35	0.08	0.05	0.05	0.04	0.01	0.02
	Convección exterior	36	-0.45	0.18	-0.30	0.12	-0.27	0.11
	Absortividad interior	37	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	Absortividad exterior	38	1.09	0.37	0.74	0.25	0.65	0.22
Otros	Inercia	39	-0.04	0.07	-0.04	0.07	-0.02	0.04
	Infiltra	40	-0.03	0.45	-0.02	0.26	-0.02	0.23
	Tterreno	41	10.01	0.41	6.74	0.28	11.52	0.34

Tabla 3.8. Parámetros μ -activos y σ -activos (en verde) con respecto a la temperatura del aire, la temperatura de la superficie del vidrio y la temperatura de la superficie del suelo.

Agrupamiento físico	μ_{vidrio}	14	15	31	36	38	40	41
Absortividad exterior	14	1.00	0.55	0.64	0.67	-0.63	-0.52	0.16
Hormigón suelo conductividad	15	0.55	1.00	0.92	0.70	-0.75	-0.86	0.01
Poliestireno espesor	31	0.64	0.92	1.00	0.86	-0.93	-0.83	-0.15
Convección exterior	36	0.67	0.70	0.86	1.00	-0.95	-0.58	-0.19
Absortividad exterior	38	-0.63	-0.75	-0.93	-0.95	1.00	0.68	0.25
Infiltra	40	-0.52	-0.86	-0.83	-0.58	0.68	1.00	0.14
Tterreno	41	0.16	0.01	-0.15	-0.19	0.25	0.14	1.00

Tabla 3.9. Correlación entre los parámetros μ -activos con respecto a la temperatura de la superficie del vidrio tras agrupamiento físico.

Agrupamiento físico	μ_{suelo}	14	15	31	36	38	40	41
Absortividad exterior	14	1.00	0.55	0.64	0.67	-0.63	-0.52	0.16
Hormigón suelo conductividad	15	0.55	1.00	0.92	0.70	-0.75	-0.86	0.01
Poliestireno espesor	31	0.64	0.92	1.00	0.86	-0.93	-0.83	-0.15
Convección exterior	36	0.67	0.70	0.86	1.00	-0.95	-0.58	-0.19
Absortividad exterior	38	-0.63	-0.75	-0.93	-0.95	1.00	0.68	0.25
Infiltra	40	-0.52	-0.86	-0.83	-0.58	0.68	1.00	0.14
Tterreno	41	0.16	0.01	-0.15	-0.19	0.25	0.14	1.00

Tabla 3.10. Correlación entre los parámetros μ -activos con respecto a la temperatura de la superficie del suelo tras agrupamiento físico.

Agrupamiento físico	σ_{vidrio}	15	31	36	38	40	41
Hormigón suelo conductividad	15	1.00	0.92	0.70	-0.75	-0.86	0.01
Poliestireno espesor	31	0.92	1.00	0.86	-0.93	-0.83	-0.15
Convección exterior	36	0.70	0.86	1.00	-0.95	-0.58	-0.19
Absortividad exterior	38	-0.75	-0.93	-0.95	1.00	0.68	0.25
Infiltra	40	-0.86	-0.83	-0.58	0.68	1.00	0.14
Tterreno	41	0.01	-0.15	-0.19	0.25	0.14	1.00

Tabla 3.11. Correlación entre los parámetros σ -activos con respecto a la temperatura del vidrio tras agrupamiento físico.

Agrupamiento físico	σ_{suelo}	15	31	36	38	40	41
Hormigón suelo conductividad	15	1.00	0.92	0.70	-0.75	-0.86	0.01
Poliestireno espesor	31	0.92	1.00	0.86	-0.93	-0.83	-0.15
Convección exterior	36	0.70	0.86	1.00	-0.95	-0.58	-0.19
Absortividad exterior	38	-0.75	-0.93	-0.95	1.00	0.68	0.25
Infiltra	40	-0.86	-0.83	-0.58	0.68	1.00	0.14
Tterreno	41	0.01	-0.15	-0.19	0.25	0.14	1.00

Tabla 3.12. Correlación entre los parámetros σ -activos con respecto a la temperatura del suelo tras agrupamiento físico.

Así, con la adición de las temperaturas de la superficie del vidrio y de la superficie del suelo se puede, en principio, resolver las ambigüedades entre diferentes parámetros con respecto a la respuesta del modelo.

En la sección siguiente se describe la instalación experimental final en el C-Ddl.

3.4. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL FINAL.

Con el objetivo de minimizar la complejidad de la instalación experimental se ha seleccionado una serie de recintos representativos del C-Ddl a monitorizar exhaustivamente, cuyas características termofísicas se puedan extrapolar al resto de sus partes. A través de dispositivos experimentales adicionales se obtendrán variables adicionales.

Es conveniente destacar en este punto que el C-Ddl dispone de un sistema de control que también toma medidas del comportamiento del edificio. Se ha escogido un sistema de medida independiente con el objetivo de mantener una mayor precisión y control sobre todos y cada uno de los elementos de la cadena de medida, requisitos que no es capaz de ofrecer a día de hoy un sistema de control comercial. En los casos en los que se considere que la redundancia de sensores no aporta nada, el sistema de control se ha preparado de forma tal que se puedan incluir todas las variables necesarias a través de una conexión vía OPC, un estándar de comunicación en el campo del control y supervisión de procesos industriales.

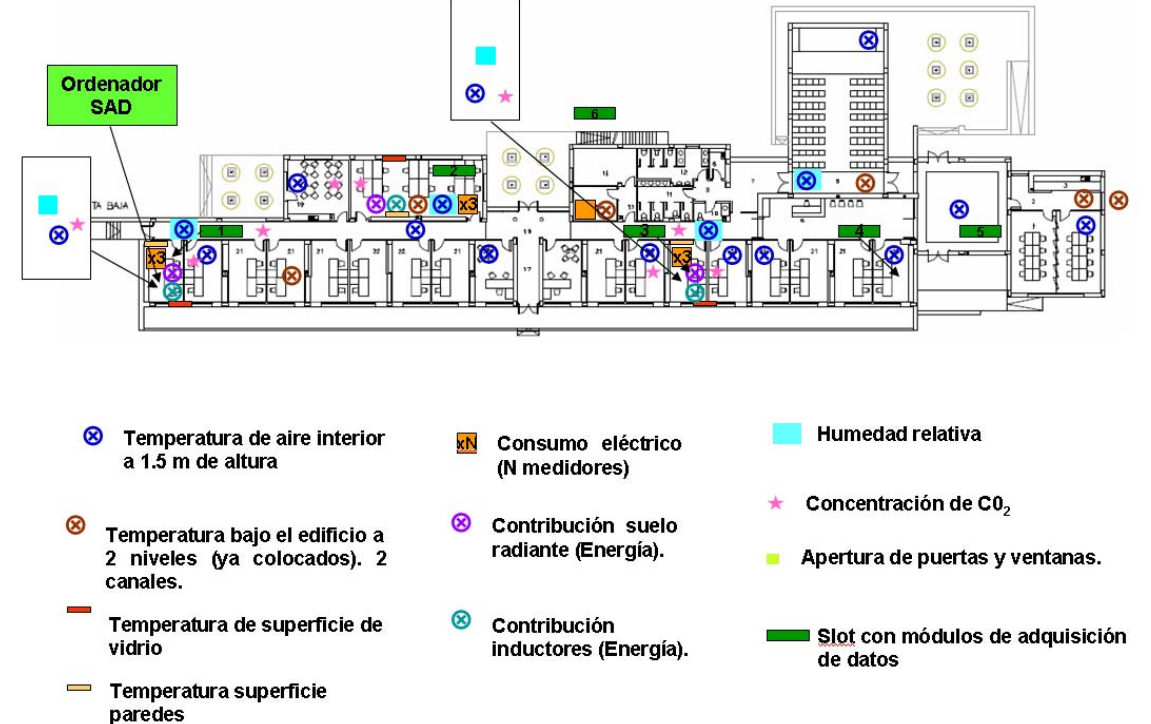
3.4.1. SELECCIÓN DE RECINTOS. VARIABLES INSTALADAS.

La monitorización del C-Ddl se ha planteado con el objetivo de dotar al C-Ddl de la instrumentación necesaria que permita llevar a cabo una evaluación global del C-Ddl y a ser posible evitando causar molestias a los usuarios del mismo.

Como puede observarse en la Figura 3.6, el C-Ddl dispone de 18 despachos con orientaciones sur ocupados por personal de plantilla de la PSA, y un despacho con orientación norte con 10 puestos de trabajo ocupados en su mayor parte por personal eventual. Todos los despachos con orientación sur son análogos excepto el despacho 1 que limita con el exterior en la zona oeste, por lo que es previsible que los despachos 2 a 18 con una misma orientación presenten un comportamiento también análogo. Los despachos monitorizados se han seleccionado con el objetivo de que sus diferencias y analogías enriquezcan el estudio.

En la figura 3.6 se indican las variables y puntos de medida considerados. Se ha monitorizado exhaustivamente un conjunto de despachos que se considera que representa el comportamiento de los recintos donde se encuentran la mayoría de los usuarios del C-Ddl. En este conjunto de despachos se están registrando todas las variables que contribuyen al balance energético tanto en el recinto considerado como en las zonas adyacentes como condiciones de contorno. Los despachos donde se ha implementado esta monitorización exhaustiva son los siguientes:

- Despacho 13 con orientación sur y centrado en la zona este como despacho típico del C-Ddl.
- Despacho de usuarios con orientación norte, por ser el único con esta orientación y además tener un número representativo de puestos de trabajo (10).



En cada una de las estancias mencionadas se han implementado todos los sensores

- Interiores: Temperatura del aire interior, temperatura de la superficie interior de los

- Exteriores: Irradiancia Solar Global sobre la horizontal y la vertical orientada al sur, temperatura del aire, flujo infrarrojo térmico sobre la horizontal, temperatura del terreno bajo el edificio a dos niveles

Por otra parte, **los análisis de confort térmico interior** que se emplearán posteriormente para comprobar el régimen de operación del C-DdI **requieren de variables adicionales. Es conveniente destacar en este punto que un análisis detallado del confort térmico interior requiere de la medida de temperatura de globo. Dicha medida debe realizarse en el centro geométrico de la planta de la estancia y a una altura de un metro y medio. Esta medida resulta intrusiva, existiendo incluso riesgo de colisión por parte del usuario, como se puede observar en la figura 3.7, por lo que finalmente se descartó su incorporación. Así, finalmente los sensores instalados son:**

- Interiores: Humedad relativa del aire.
- Exteriores: Humedad relativa del aire, velocidad y dirección del viento.



Figura 3.7. Sensor de temperatura de globo instalado en un despacho de la facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid.

Finalmente, **para evaluar las estancias en condiciones reales de uso se emplean medidas adicionales, algunas de ellas como medidas indirectas de algunos fenómenos físicos directamente relacionados con la ocupación:**

- Interiores: Concentración de CO₂ en el aire, estado de abiertas o cerradas de puertas y ventanas.

- Sistemas activos: Medida del calor introducido o extraído por los sistemas activos de climatización: caudal y temperaturas de impulsión y retorno en los circuitos de suelo radiante e inductores.
- Exteriores: Concentración de CO₂ en el aire.
- Otros: Medidas de consumo eléctrico en diferentes equipos y en iluminación para conocer la disipación de calor en el interior.

3.4.2. SENSORES Y SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

Los sensores, igual que el resto de los elementos de la cadena de medida se han seleccionado para obtener la máxima exactitud posible en la medida, teniendo en cuenta no solo los elementos transductores y la conversión eléctrica entre la medida y la señal eléctrica generada, sino además los elementos de protección utilizados, elección de ubicación y montaje.

Si bien existen numerosas referencias bibliográficas que tratan sobre los diferentes elementos sensores y su exactitud (IEC, 1983; IEC, 1982; DIN 2002; WMO, 1996; Visscher, 1999; ISO 9060), existe escasa documentación referente a metrología de edificios.

A continuación se mencionan los elementos sensores utilizados para cada una de las variables haciendo énfasis los criterios particulares que se refieren principalmente a los aspectos propios de la monitorización de los C-DdIs del PSE-ARFRISOL.

TEMPERATURA.

La medida de esta magnitud tiene gran influencia sobre la estimación de los parámetros térmicos del cerramiento por lo que debe medirse con la mayor exactitud posible.

Para la mayoría de las medidas de temperatura se utilizan termorresistencias de platino ya que son los que presentan mayor exactitud, linealidad, estabilidad dentro de los rangos de temperatura que se dan durante los ensayos. Se trata de dispositivos cuya resistencia depende linealmente de la temperatura en el rango entre 0°C y 100°C. Estos dispositivos se clasifican de acuerdo a diferentes normas (IEC, 1983) en función de su exactitud que depende de la pureza del platino utilizado.

Se han utilizado termorresistencias de platino tipo PT100 de clase 1/10 según DIN 43760 (Figura 3.8) que se encuentran entre los de mayor exactitud de acuerdo a esta clasificación.

El modo de colocación afecta significativamente a esta medida, y depende de qué temperatura se trate (aire, superficie, canales de aire, tuberías, terreno bajo el edificio, etc). A continuación se describe cómo se han colocado los sensores correspondientes en cada uno de los casos.

Los sensores de temperatura de aire en el interior de recintos deben encontrarse protegidos de la incidencia de la radiación solar mediante una caja que permite la ventilación (Figura 3.8) y alejados de fuentes de calor. Si es posible en un punto centrado en el recinto, y si no es posible al menos a una altura media, próximo a una de sus paredes, preferiblemente en la pared

opuesta a la ventana, para evitar al máximo perturbaciones por la incidencia de radiación solar directa (Figura 3.10 y Figura 3.11).

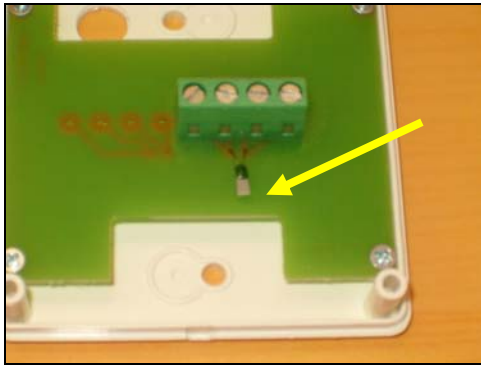


Figura 3.8: Elemento sensor: Termorresistencia de platino PT100 Clase 1/10 DIN.



Figura 3.9: Instalación de sensores de temperatura (izquierda) y humedad relativa interior (derecha).



Figura 3.10: Instalación de sensores de humedad relativa interior (izquierda), temperatura (centro) y CO2 (derecha) en pasillo próximo a despacho 13.



Figura 3.11: Instalación de sensores de temperatura de aire (izquierda), CO2 (centro) y humedad relativa (derecha) despacho 13.

Los sensores de temperatura del aire exterior se colocan en espacio abierto que se encuentre a una temperatura representativa de la temperatura del exterior del C-Ddl, normalmente sobre la cubierta en un mástil donde también se colocan el resto de los sensores meteorológicos. Se protegen con elementos que eviten sobrecalentamientos debidos a la incidencia de radiación solar y favorezcan la ventilación lo que permite igualar la temperatura entre el sensor y el aire que se mide. La localización del sensor debe ser representativa, y evitando la proximidad a fuentes de calor, u otros elementos que puedan perturbar la medida.

En la Figura 3.12 y la Figura 3.13 se muestra el dispositivo utilizado, que consiste en un conjunto de láminas paralelas de color blanco, y separadas entre sí por un espacio que permite la circulación de aire. El elemento sensor se encuentra en el hueco interior de este dispositivo, de manera que cuando las láminas superiores se calientan por efecto de la radiación solar se produce una ventilación natural que favorece la entrada de aire exterior hacia la zona donde se encuentra el sensor facilitando la medida de la temperatura de este aire.



Figura 3.12.: Sensores meteorológicos. Al pie del mástil registro que aloja módulos de adquisición de datos.



Figura 3.13: Humedad y temperatura exterior con protector de radiación.

Como sensores de temperatura de superficie se han utilizado dispositivos que pueden ser fijados tanto sobre superficies curvas como planas. En estos dispositivos el elemento sensor de platino se encuentra embutido entre dos láminas de poliamida de 0.5 mm de espesor.

Para fijarlas sobre las superficies medidas se ha utilizado cinta transparente adhesiva de doble cara. En la Figura 3.14 y la Figura 3.15 se muestran uno de estos sensores instalado de esta forma sobre la superficie de un vidrio.

En el caso de superficies opacas como paredes y muros de chimeneas solares, una vez colocados los sensores se han pintado de forma que los sensores queden completamente integrados en la superficie a medir.

Los sensores colocados en vidrio expuesto a la radiación solar se han protegido con cinta de aluminio que refleja gran parte de la radiación incidente reduciendo la perturbación producida por la incidencia de esta radiación sobre el sensor.

La medida de la temperatura del agua en tuberías en circuitos de impulsión y retorno junto con la medida de caudal en circuitos de suelo radiante e inductores se utiliza para obtener la energía aportada al recinto mediante estos sistemas.



Figura 3.14: Termorresistencias de platino tipo PT100 utilizadas para la medida de superficie en vidrio de ventana.



Figura 3.15: Detalle de termorresistencias de platino tipo PT100 utilizadas para la medida de superficie en vidrio de ventana.

Para medir correctamente esta variable es necesario conseguir que el sensor quede bien sumergido en la corriente de agua, para ello se colocan contracorriente según el esquema que se presenta en la Figura 3.16. Esta disposición se consigue mediante un termopozo que se inserta en las tuberías como se observa en la Figura 3.18. En la Figura 3.18 y la Figura 3.19 se muestran algunos detalles de la preparación de este montaje. El elemento sensor se inserta en el termopozo y se utiliza pasta conductora para facilitar que el sensor alcance la temperatura del fluido a medir. Una vez colocado el sensor se recubre todo con aislante de neopreno, para evitar perturbaciones en la medida debidas a la temperatura del aire circundante, u otras fuentes o sumideros de calor.

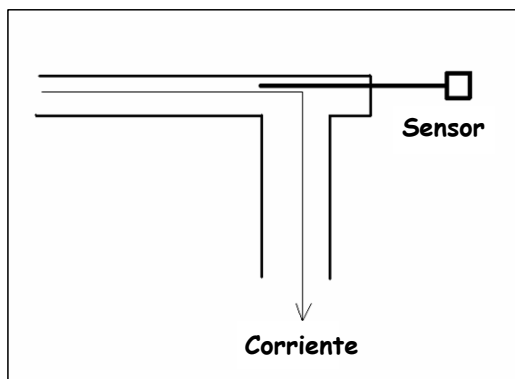


Figura 3.16: Esquema de colocación de sensores de temperatura en tuberías.

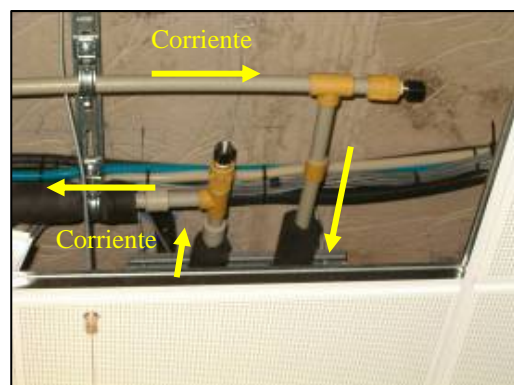


Figura 3.17: Adaptación de fontanería para colocación de sensores de temperatura de tuberías.



Figura 3.18: Detalle de colocación de vaina para medida de la temperatura en tuberías de suelo radiante e inductores en sala de becarios.

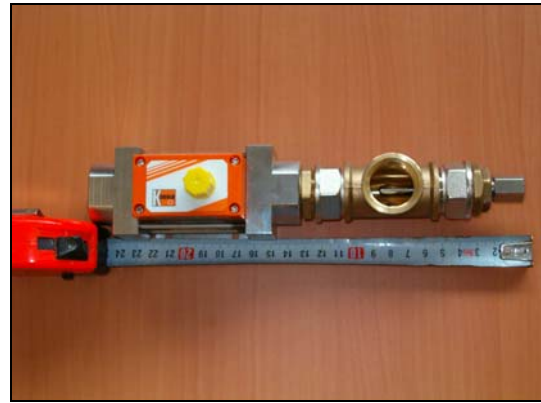


Figura 3.19: Detalle de instalación de caudalímetro y de vaina para medida de la temperatura en tuberías de suelo radiante e inductores en despachos.

En el caso de la temperatura del terreno bajo el C-Ddl resultaría complicado y costoso colocar sensores para medir esta variable una vez terminado el C-Ddl y en caso de que se instalasen antes de la construcción existe un riesgo muy alto de que sufran desperfectos debido a este proceso tanto los sensores como los cables de conexiones.

Para evitar estos problemas se han utilizado dispositivos donde el elemento sensor se encuentra embutido en una lámina robusta de goma. El cable conexión de este dispositivo está aislado con teflón con mallaa de acero inoxidable (Figura 3.20).



Figura 3.20: Dispositivo utilizado para medida de la temperatura bajo el terreno.



Figura 3.21: Arquetas utilizadas para colocar sensores de la temperatura en el terreno bajo el C-Ddl.

Estos sensores se han colocado durante la construcción del C-Ddl y se han distribuido por el edificio como se indica en la Figura 3.6. En cada una de las ubicaciones marcadas en esta figura se ha colocado un sensor a 1 m de profundidad y otro bajo el suelo. Para ello se han preparado unas arquetas. En primer lugar se han introducido los sensores en estas arquetas,

quedando a 1 m de profundidad (Figura 3.21). Una vez colocado cada uno de estos sensores se ha rellenado la arqueta del mismo material que el resto del terreno circundante. Por último se han colocado los sensores bajo el suelo.

CAUDAL.

Esta medida junto con la diferencia de temperatura de impulsión y retorno en circuitos de suelo radiante e inductores se utiliza para obtener la energía aportada al recinto mediante estos sistemas.

Se han utilizado caudalímetros con una exactitud del 2.5% del fondo de escala. Los dispositivos utilizados son de efecto vórtice adecuados para medida de caudal en líquidos de baja viscosidad como el agua, que es el fluido en este caso. El funcionamiento de los dispositivos utilizados no se ve dañado por el uso para líquidos salinos o agresivos, aunque no deben ser utilizados para fluidos abrasivos o con alta concentración de fibras.

El caudalímetro debe adaptarse a la tubería donde sea instalado sin perturbarla, por lo que debe seleccionarse con el mismo diámetro que esta. También es importante que el rango del caudalímetro sea adecuado al rango del caudal a medir.

La Figura 3.22 a la Figura 3.25 muestran algunos detalles de la instalación de caudalímetros. Una vez instalados se ha recubierto con el mismo aislante de neopreno que el resto de la tubería, para evitar perturbaciones en la temperatura del fluido debidas a la temperatura del aire circundante, u otras fuentes o sumideros de calor.

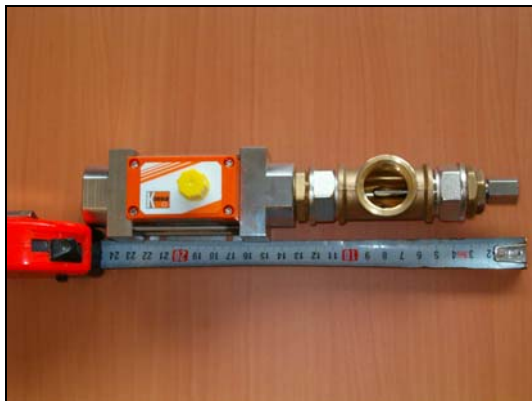


Figura 3.22: Detalle de la instalación del caudalímetro de vaina para medida de temperatura en tuberías de suelo radiante e inductores en despachos.



Figura 3.23: Caudalímetro instalado para la medida de la temperatura en tuberías de suelo radiante en la sala de becarios (Sobre falso techo).

CONSUMO ELÉCTRICO.

Se miden todos los consumos eléctricos en el recinto con el objetivo de cuantificar el aporte de energía debido a la disipación correspondiente dentro de este recinto. Para ello se mide la

potencia activa consumida para todas las líneas eléctricas que alimentan a los recintos considerados (iluminación, calefacción, etc.).

Esta magnitud juega un importante papel en la estimación de las propiedades térmicas, por lo que debe ser medida con la mayor exactitud posible. Para ello es muy importante que el rango del equipo utilizado sea lo más próximo posible al rango de la variable a medir.

En el caso de que el rango de la medida permita llevarla a cabo sin transformador se han utilizado vatímetros de clase 0.25 según la norma IEC 60688:1992. En el caso del que el rango de la medida nos obligue a utilizar transformador, se han utilizado los de clase 0.5, ya que no se han encontrado en el mercado transformadores de mayor exactitud. En las figuras 3.26 y 3.27 se pueden observar los elementos de medida del consumo eléctrico.



Figura 3.24: Caudalímetro instalado para la medida de la temperatura en tuberías de inductores en despacho 1 (Sobre falso techo).



Figura 3.25: Caudalímetro instalado para la medida de la temperatura en tuberías de inductores en despacho 1 (En distribuidor junto a la puerta de despacho 2).



Figura 3.26: Registros donde se alojan los módulos de la adquisición de los datos y los vatímetros.



Figura 3.27. Medidores del consumo eléctrico.

HUMEDAD RELATIVA.

Dado que esta magnitud no interviene habitualmente de manera directa en los cálculos de los parámetros térmicos (aunque resulta importante para la evaluación del confort térmico), no se ha establecido ningún requerimiento específico derivado de su influencia sobre los cálculos en cuanto a exactitud en su medida, por lo que tal medida se lleva a cabo de acuerdo con recomendaciones generales de acuerdo con las recomendaciones de medida de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 1996).

Se han utilizado dispositivos con una exactitud del 2%, cuyo elemento sensor es de tipo capacitivo. Estos sensores son pequeños, su respuesta es rápida, no disipan calor. Se han instalado con protecciones análogas a las de los sensores de temperatura, y utilizando filtros protectores, y deben mantenerse en buenas condiciones de limpieza.

Deben evitarse la exposición a humedades altas y sobre todo evitar que el agua líquida alcance el elemento sensible (Visscher, 1999). Estos dispositivos suelen ser sensibles a las interferencias electromagnéticas por lo que debe verificarse la compatibilidad de las condiciones ambientales en el comportamiento de la electrónica del sensor y tener en cuenta cualquier desviación en la medida que pueda derivarse de este hecho (WMO, 1996).

DETECCIÓN DE LA APERTURA DE PUERTAS Y VENTANAS.

Se han utilizado interruptores magnéticos. Estos dispositivos permiten distinguir si la puerta está “cerrada” o está “no cerrada”. En el caso de que esté “no cerrada” no es posible determinar en qué porcentaje está abierta. Sin embargo la información proporcionada es muy útil respecto a la obtención de las propiedades térmicas de los recintos monitorizados.

CONCENTRACIÓN DE CO₂.

Esta medida se incluye en la monitorización con dos objetivos:

- En el caso de que los recintos se encuentren ocupados, obtener información acerca del estado de ocupación.
- Estudiar la posibilidad de obtener el nivel de infiltraciones de los recintos para recintos vacíos como alternativa a la medida mediante dispositivos basados en gas traza.

En ambos casos se trata de una primera aproximación al problema, por lo que los únicos requerimientos impuestos a los dispositivos de medida se han referido a la compatibilidad con el sistema de adquisición de datos de monitorización y proporcionar la máxima flexibilidad en cuanto a integración dicho sistema (disponer de salida de 4 a 20 mA) y tener una exactitud aceptable respecto al resto de las medidas realizadas (3%).

IRRADIANCIA SOLAR.

Esta magnitud tiene un papel importante en estimación de los parámetros característicos de los recintos, por lo que debe ser medida con la mayor exactitud posible.

Se han utilizado piranómetros para medir la irradiancia solar hemisférica (ISO 9060), en una superficie receptora plana, que resulta de flujos radiantes incidentes, con longitud de onda en el rango $0.3\mu\text{m}$ a $3\mu\text{m}$.

Dada la importancia que la medida de esta magnitud tiene respecto a la estimación correcta de los parámetros obtenidos a partir de los datos registrados con la monitorización, se utiliza un piranómetro que cumple con las especificaciones de patrón secundario según la clasificación establecida por la norma ISO 9060:1990. Aunque la sensibilidad de este dispositivo depende de varios parámetros, el error máximo sobre la medida de irradiancia horaria para el equipo utilizado es del 3%.



Figura 3.28: Equipos de medida de irradiancia: Horizontal y en el plano de los captadores.

Esta magnitud se mide en el plano horizontal, vertical e inclinado (según la superficie del plano de los captadores solares, figura 3.28). El piranómetro debe instalarse libre de obstáculos que puedan producir sombra sobre él, así como de objetos que le puedan reflejar radiación. Tiene que ser fácilmente accesible para limpieza de cúpula e inspección o sustitución de sales secantes.

Debe tenerse en cuenta que fuentes de calor por encima de $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ pueden generar radiación en el rango de medida del piranómetro por lo que deben de tomarse las precauciones necesarias para evitar perturbaciones debidas a este tipo de fuentes. Debe evitarse la falta de equilibrio térmico en el instrumento ya que ello induciría errores en las medidas de diferencia de temperatura en las cuales se basa su funcionamiento. Este tipo de fluctuaciones puede deberse a variaciones de temperatura en el soporte donde se instale el piranómetro, por lo que

deben de tomarse las precauciones necesarias para aislarlo térmicamente del soporte donde se instale.

RADIACIÓN DE ONDA LARGA.

Tradicionalmente esta medida no se suele incluir en las monitorizaciones de edificios. Se incluye en la monitorización que se referencia en esta investigación ya que estudios previos recientes han puesto de manifiesto la importancia de los efectos no lineales debido al intercambio de radiación de onda larga (Porcar, 2008; Jiménez, 2008).

Existe escasa variedad de dispositivos en el mercado para la medida de esta variable, y los que existen tienen características similares, por lo que se ha seleccionado el que proporciona mejor documentación y soporte técnico. El dispositivo utilizado tiene una exactitud del 1%.

VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DE VIENTO.

En general la posición adecuada para la medida del viento sobre un terreno llano es de diez m por encima de dicho terreno. En caso de que la medida se lleve a cabo a una altura diferente esta debe ser ajustada para obtener una estimación correspondiente a la altura normalizada.

En el caso de monitorización de edificios resulta difícil cumplir estrictamente estos requisitos por lo que es habitual colocar este dispositivo unos 2 m sobre el punto más alto de la cubierta del mismo, lo cual proporciona la información necesaria para analizar la influencia del viento sobre el edificio monitorizado.

SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

Se ha utilizado un sistema de adquisición de datos distribuido. Este sistema se compone de módulos distribuidos por zonas del edificio. En cada zona se ha ubicado un grupo de módulos donde se reciben las señales analógicas de los sensores de la zona correspondiente. En estos módulos se lleva a cabo la conversión analógica digital de las señales, y esta información digital es transmitida a través de la red Ethernet desde cada grupo al ordenador donde es registrada.

Las zonas y grupos de sensores correspondientes se han establecido de forma que se minimice la longitud de los cables que transmiten señal analógica, lo cual es posible debido a que el sistema de adquisición de datos es modular. En este C-DdI se han establecido 6 zonas. Tras un estudio llevado a cabo por la Universidad de Almería, que analizaba las diferentes tecnologías existentes en el mercado para implantar un sistema con estas características (Pasamontes, 2006), se decidió utilizar un sistema de adquisición de datos compuesto por módulos Compact FieldPoint de National Instruments.

CABLEADO.

El cableado, al igual que el resto de los elementos de la cadena de medida, se han implementado con el objetivo de reducir tanto como sea posible las incertidumbres que pudiera introducir. Para ello se han tomado las siguientes precauciones:

- Como se ha expuesto con anterioridad, se ha seleccionado un sistema distribuido con el objetivo de minimizar la longitud de cable que transmite señal analógica para minimizar las incertidumbres que puedan deberse a dicho cable.
- Todos los sensores que generan señales en resistencia se han medido a 4 hilos.
- Todos los sensores que generan medida en voltaje se han medido en modo diferencial.
- Para los sensores que pueden generar de forma opcional varios tipos de salida, se ha elegido la salida en 4 a 20 Ma, por ser la más inmune a perturbaciones para transmisión a distancia.
- Para la transmisión de señales analógicas se han utilizado pares de hilos trenzados y apantallados al par y al conjunto para evitar interferencias en la transmisión de la señal.
- Se ha evitado el uso de convertidores ya que su uso acarrearía una fuente adicional de incertidumbre (además de aumentar el coste de la instalación).
- En el caso de que hubiera algún sensor para el que el uso de convertidores sea absolutamente imprescindible, estos se seleccionan con salida de 4 a 20 Ma y se colocan junto al sensor correspondiente.

3.4.3. INCERTIDUMBRE FINAL ASOCIADA A LAS MEDIDAS.

Los datos experimentales siempre llevan asociado un determinado grado de incertidumbre, aunque sólo sea debido a la resolución finita de los sensores empleados. Una aproximación habitual para caracterizar dicha incertidumbre consiste en asumir que los datos llevan añadido un cierto nivel de ruido aleatorio, cuya función de densidad de probabilidad es conocida. Aunque es una visión muy popular, existen argumentos críticos contra ella, puesto que normalmente no se dispone de datos experimentales suficientes como para verificar las hipótesis realizadas 'a priori' sobre la función de distribución de probabilidad asociada al ruido. De hecho, en muchas ocasiones la mayor contribución al error no es de naturaleza aleatoria y, por consiguiente, no es bien descrito por ruido aleatorio.

Una alternativa a la caracterización estocástica de los errores es la caracterización por sus cotas inferiores y superiores en cada medida. La mayoría de los fabricantes de sensores proporcionan métodos de cálculo para la incertidumbre de los sensores en función de sus condiciones de operación. Otros errores estructurales como, por ejemplo, el sesgo debido a su localización conducen a estimaciones de esas cotas más pesimistas. Esas cotas se deben ver como los valores más extremos del error entre el modelo y el sistema que pueda considerar aceptable un experimentador.

En este trabajo la incertidumbre asociada a la medida de la temperatura del aire interior – la variable principal de estudio – ha sido estimada según (ISO, 1995). Para la estimación de su incertidumbre se han tenido en cuenta las siguientes contribuciones: la precisión del sensor, la resolución del sistema de adquisición de datos, la influencia de cables y las conexiones y las heterogeneidades de la temperatura del aire en el recinto.

Dadas las características de los sensores y del sistema de adquisición de datos, se puede identificar la heterogeneidad del aire como la principal contribución a la incertidumbre experimental. **La estimación de la incertidumbre total asociada a la medida corresponde a un valor de 0.5 °C**, a un intervalo de confianza del 95%, empleando un factor de cobertura $k = 2$.

La expresión empleada para el cálculo de la incertidumbre es la siguiente:

$$u(T_i) = k \sqrt{u_{\text{SENSOR}}^2(T_i) + u_{\text{DISTRIBUCIÓN_ESPACIAL}}^2(T_i)} \text{ , (ec. 3.7)}$$

Donde $u_{\text{SENSOR}}(T_i)$ es la contribución a la incertidumbre debida al elemento sensor. De acuerdo con las especificaciones del fabricante, la precisión del sensor en el rango de la temperatura del aire es de 0.05 °C. La norma ISO empleada sugiere el empleo de una distribución cuadrada para estimar la incertidumbre asociada.

$U_{\text{DISTRIBUCIÓN_ESPACIAL}}(T_i)$ es la contribución a la incertidumbre debida a la localización del sensor y que tiene en cuenta las heterogeneidades espaciales en la temperatura del aire. Se emplearon medidas realizadas con sensores portátiles en cinco localizaciones distintas y, cuando se dispone de ellas, la norma recomienda emplear una distribución normal para estimar la incertidumbre correspondiente.

Las contribuciones debidas al sistema de adquisición de datos y a las perturbaciones introducidas por el cableado se han asumido despreciables dada la instalación experimental realizada.

Una vez descrita la instalación experimental, en el siguiente capítulo se abordan los análisis preliminares de los datos experimentales obtenidos durante la campaña de adquisición.

3.5. CONCLUSIONES.

En los siguientes puntos a continuación se resumen los resultados más relevantes de este capítulo:

- Se ha escogido el **C-DdI del SP4 del PSE-ARFRISOL** para evaluar la posibilidad de emplear modelos de simulación en la evaluación experimental en condiciones reales de uso y la posibilidad de desarrollar un modelo de orden reducido para el control predictivo del mismo.

- La elección se ha efectuado con el **criterio de que su cerramiento**, con respecto al resto de los C-Ddl del PSE-ARFRISOL, es el que **presenta características menos dinámicas** (al contrario que las fachadas ventiladas o las dobles pieles) **y, por tanto, se ajusta mejor a las hipótesis del modelo de simulación**. Este hecho reduce la incertidumbre asociada al ajuste del modelo.
- Se ha descrito el C-Ddl del SP4 desde un punto de vista térmico, tanto en su proyecto original como las sugerencias de mejora del diseño en el seno del PSE-ARFRISOL.
- Se ha implementado un modelo de simulación, diferente al original para evaluar las sugerencias del diseño y realizar la evaluación teórica, con el objetivo de realizar un análisis de sensibilidad para el diseño del experimento.
- **Se han identificado los parámetros activos del modelo de simulación creado para el diseño del experimento y se han calculado las correlaciones existentes entre ellos..**
- De hecho, **se han definido de forma original definiciones de actividad en función de características estáticas o dinámicas del sistema. Se ha definido lo que es un parámetro μ -activo y un parámetro σ -activo.**
- **Se ha demostrado que si sólo se toma la medida de la temperatura del aire interior**, incluso bajo el empleo de una técnica de agrupamiento de parámetros basada en las propiedades física del sistema, **no es posible resolver las correlaciones entre los diferentes parámetros activos.**
- **Se ha implementado como elemento innovador en el caso de los modelos de simulación en espacio de estados un diseño del experimento multisalida**, basándose en experiencias previas del grupo investigador en la identificación de modelos en función de transferencia.
- **Se ha demostrado cuantitativamente que la inclusión de la temperatura de la superficie interior del vidrio y de la temperatura de la superficie del suelo interior permiten resolver las correlaciones entre los parámetros activos del sistema durante la evolución libre**, si se aplican junto a una técnica de agrupamiento basada en las propiedades físicas del sistema.
- **Se han seleccionado estancias representativas del comportamiento del C-Ddl**, con el objetivo de minimizar el esfuerzo material, económico y humano en el seno del proyecto. **Se desarrolla, pues, una monitorización por muestreo de estancias representativas.**
- **Se ha seleccionado la instrumentación y los equipos de medida con respecto a los estándares internacionales más adecuados al respecto.**
- Se ha calculado, mediante una norma ISO, la incertidumbre asociada a la medida. **En el caso de la temperatura del aire interior, la aplicación de la norma ISO proporciona un valor para la incertidumbre experimental de la medida e igual a 0.5 °C.**

CAPÍTULO 4. RESULTADOS PRELIMINARES

4.1. INTRODUCCIÓN.

Una vez que se ha diseñado el experimento y se ha puesto en marcha la instalación experimental se procede a los primeros análisis de los datos experimentales. En primer lugar se describen cualitativamente los datos experimentales disponibles y los periodos escogidos para cada uno de los análisis a realizar.

Como paso previo al estudio de la validez del modelo de simulación descrito en el capítulo anterior se realizan una serie de análisis de la representatividad de la muestra escogida para la monitorización. Dado que el diseño experimental partió de una selección de estancias en las etapas previas a la finalización de la construcción y a la ocupación real del mismo, la representatividad de la muestra es una de las primeras preguntas que deben obtener respuesta.

La representatividad de la muestra con respecto al comportamiento global del C-DdI se estudia desde dos aspectos fundamentalmente: el régimen de operación y la homogeneidad de la construcción. La representatividad muestral del régimen de operación de las estancias seleccionadas del C-DdI implica dos estudios diferenciados: que se cumplan las condiciones de confort exigibles a la edificación y que la operación por parte de los usuarios de las estancias seleccionadas sea similar a las del resto de las estancias del C-DdI.

La siguiente comprobación que se realiza sobre la instalación experimental se refiere a la comprobación de una de las hipótesis fundamentales del modelo: que la temperatura del aire interior del recinto puede ser representada fielmente por un único valor.

Tras estas comprobaciones se procede a comprobar la validez del modelo de simulación empleado en el diseño experimental. Para ello se emplea la serie temporal correspondiente a la evolución libre del C-DdI durante el verano de 2009.

Finalmente, se ofrecen algunas conclusiones sobre el estudio realizado y se indican los siguientes pasos a realizar.

4.2. DESCRIPCIÓN DE LAS SERIES TEMPORALES EMPLEADAS.

La campaña de monitorización en el C-DdI SP4 comenzó tras instalarse los sensores en 2008, continúa en la actualidad y se prevé que una vez finalizado el proyecto se puedan tomar más datos experimentales para futuros estudios. En este trabajo sólo se incluyen los datos experimentales generados hasta el 19 de mayo de 2011, aunque para determinadas comprobaciones se han empleado datos experimentales medidos posteriormente.

A las series temporales de datos experimentales obtenidas se le aplican una serie de controles de calidad, en función del tipo de estudio a realizar. En primer lugar, se descartan todos los días en los que ha habido una interrupción del sistema de adquisición de datos superior a media hora. Para la serie de datos experimentales considerada este hecho se traduce en 991 días de adquisición de datos experimentales, de los que se descartan 171 por interrupciones en el sistema de adquisición de datos (interrupciones eléctricas, incidencias informáticas,

paradas del sistema para mantenimiento/instalación de sensores, etc.). **Así, tras el primer control de calidad, se dispone de un 83% de datos potencialmente útiles, equivalente a 830 días de datos experimentales.** En la tabla 4.1 se presenta esta información de forma gráfica, con los días descartados por interrupción del servicio en rojo y los días potencialmente útiles en verde. Existen interrupciones por mantenimiento y mejora durante abril del 2009 y enero de 2010. A partir de junio de 2010 las interrupciones del sistema de adquisición de datos se vuelven más frecuentes debido principalmente a las pruebas de nuevas versiones de software de adquisición de datos para la comunicación con el sistema de Control del C-DdI como resultado de la I+D llevada a cabo por otros grupos de investigación participantes en el proyecto. En cualquier caso, se dispone de datos experimentales suficientes como para realizar los análisis propuestos en los objetivos del estudio.

En la tabla 4.1 sólo se indican los días de datos experimentales potencialmente útiles, ya que el hecho de que no haya interrupción del servicio no asegura la validez de los datos. Además, para cada uno de los estudios a realizar se requiere que cada uno de los sensores implicados funcione correctamente durante el periodo seleccionado. Así, para cada estudio se selecciona una serie temporal determinada.

	L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D	L	M						
2008																																				
Ago				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
Sep						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Oct			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31			
Nov				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30			
Dic					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
2009																																				
Ene			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31			
Feb						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28			
Mar						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Abr			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30				
May				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
Jun						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Jul			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31			
Ago				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
Sep			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30				
Oct				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
Nov					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
Dic			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31			
2010																																				
Ene				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
Feb						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28			
Mar						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Abr			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30				
May				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
Jun			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30				
Jul				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
Ago					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
Sep			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30				
Oct				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
Nov					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
Dic			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31			
2011																																				
Ene				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
Feb			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28						
Mar			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31			
Abr				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30			
May					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
Jun			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30				

Tabla 4.1. Interrupciones del sistema de adquisición de datos superiores a media hora (en rojo) y días de datos potencialmente útiles (en verde).

Los estudios menos exigentes son los relativos al confort térmico, pues requieren de las temperaturas interiores, humedades relativas interiores y las variables meteorológicas exteriores. Otros estudios, como los relativos a la validez del modelo de simulación empleado son más exigentes y requieren del funcionamiento correcto de las variables seleccionadas en el capítulo anterior y de series lo más largas posibles sin interrupciones. Este hecho es debido a que la respuesta al modelo es fuertemente dependiente de las condiciones iniciales escogidas. Una solución adoptada comúnmente para alargar series temporales con huecos consiste en la interpolación. En el caso que nos ocupa no es necesario por disponer de datos experimentales seleccionando dos series temporales para el estudio. La primera del 1 de agosto de 2009 hasta el 31 de diciembre de 2009 (serie 2009) y la segunda del 26 de enero de 2010 hasta el 30 de abril de 2010 (serie 2010). Se puede observar que las series temporales seleccionadas para la validación de los modelos de simulación no coinciden exactamente con el máximo de días potencialmente útiles para ese periodo. Hay que destacar en este punto que no sólo el sistema de adquisición de datos debe encontrarse en funcionamiento, el sistema de registro asociado al sistema de control también debe proporcionar información fidedigna durante el periodo. Por ello, la longitud de las series de validación es más corta que la potencial.

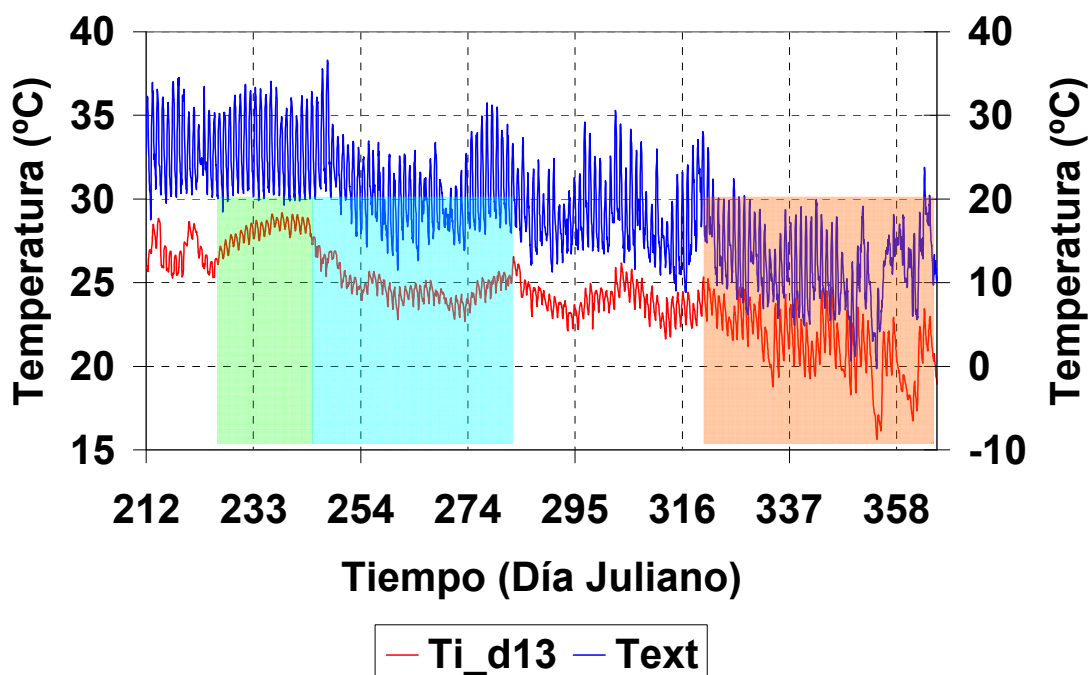


Figura 4.1. Temperaturas interior y exterior para la serie 2009 del despacho 13. En verde se muestra la evolución libre, en azul el periodo dominado por la refrigeración y en naranja el periodo dominado por la calefacción.

En las figuras 4.1 y 4.2 se muestran los datos experimentales correspondientes a las temperaturas interior y exterior para las series 2009 y 2010, respectivamente. Se destacan con

color verde los periodos de evolución libre, en azul los dominados por la la refrigeración y en naranja los dominados por la calefacción.

En la serie 2009 se encuentran los tres periodos. Esto es debido a que, por cuestiones operativas, la Plataforma Solar de Almería cierra sus instalaciones durante una quincena de Agosto. Durante este periodo el edificio no está ocupado y las instalaciones activas se encuentran fuera de servicio. Como se verá más adelante, este periodo de evolución libre representará una información clave para el análisis de la validez del modelo de simulación.

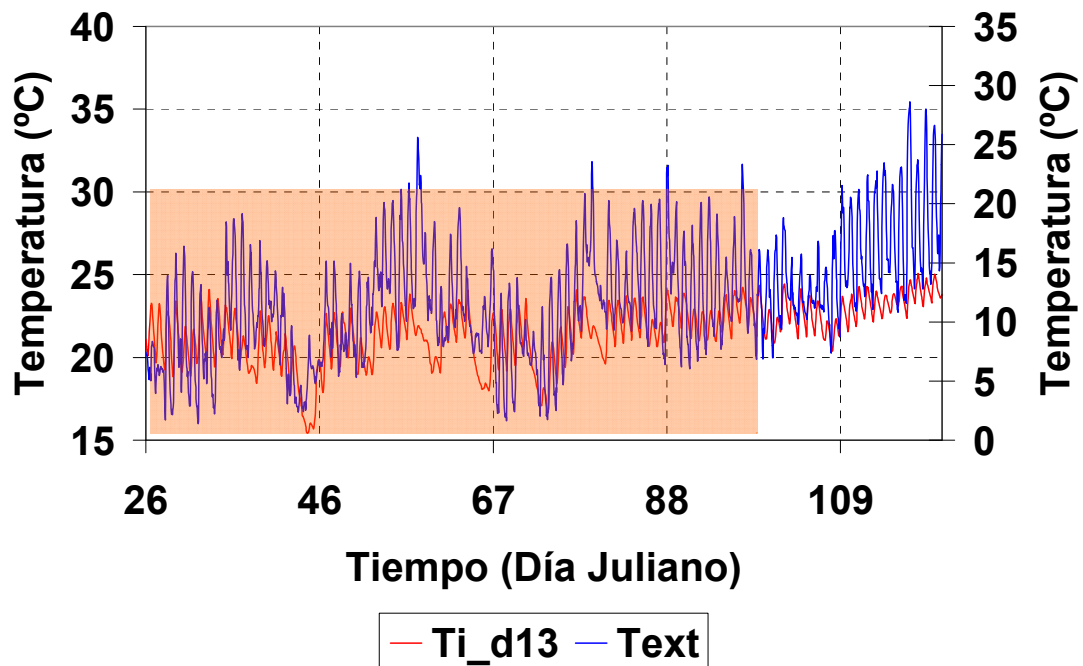


Figura 4.2. Temperaturas interior y exterior para la serie 2010 del despacho 13. En naranja se muestra el periodo dominado por la calefacción. La serie no contiene un periodo estrictamente dominado por la refrigeración.

En la serie 2010 se muestra una situación dominada por la calefacción en los primeros meses y menos demandante de energía hacia el final de la serie, donde no se puede hablar de situación claramente dominada por la refrigeración.

Así, **para el periodo de monitorización considerado, se dispone de dos series temporales sin interrupciones del servicio y lo suficientemente largas para el propósito del estudio, correspondientes a los valores horarios de los periodos comprendidos entre el 1 de agosto de 2009 y el 31 de diciembre de 2009 y el 26 de enero de 2010 y el 30 de abril de 2010. Dichas series temporales incluyen, además, todas las fenomenologías presentes en una edificación: evolución libre, calefacción y refrigeración.**

4.3. ANÁLISIS DE LA REPRESENTATIVIDAD DE LOS RECINTOS ESCOGIDOS

Una de las aproximaciones fundamentales del diseño experimental del C-Ddl reside en la hipótesis de que el comportamiento de los despachos seleccionados es representativo del conjunto del resto del edificio. Por ello, se procede a evaluar su representatividad.

Dicha representatividad se comprueba atendiendo a dos aspectos fundamentales: la homogeneidad de la construcción y su régimen de operación. La homogeneidad de la construcción se comprueba cualitativamente mediante la realización de termografías de la fachada sur. Aunque la termografía es una técnica útil para aspectos cualitativos tiene limitaciones en aspecto cuantitativos, con diferencias muy notables en la construcción tales como puentes térmicos que pueden ser detectadas de un modo rápido y eficiente.

En cuanto al régimen de operación de los recintos escogidos es conveniente realizar dos distinciones: que operen según las condiciones de diseño y que operan de forma similar al resto de los recintos no monitorizados exhaustivamente. Para comprobar que operan según las condiciones de diseño se realiza un análisis del confort térmico en el interior de las estancias. Dicho análisis requiere del análisis del perfil de temperatura interior y de su relación con el exterior, representado de forma estadística para todo el periodo y de forma detallada para los días más representativos del mismo. El análisis de confort requiere, asimismo, de la definición de un índice que represente adecuada y cuantitativamente las desviaciones de las condiciones de confort térmico ideal. Finalmente, también se requiere de un criterio para la evaluación del índice de confort térmico solamente en los periodos ocupados del C-Ddl, ya que la inclusión de toda la serie de datos experimentales – incluidos los valores nocturnos, por ejemplo - en el análisis puede desviar la estadística.

Para comprobar que los recintos seleccionados se comportan de forma similar al resto de las estancias se requiere de más valores experimentales, pertenecientes al resto de las estancias. Una vez obtenidos dichos valores, se requiere de una técnica matemática que permita discriminar los parecidos y las diferencias entre unas estancias y otras. Parámetros como las diferencias en media de las temperaturas no resultan de interés en este caso, ya que eliminan diferencias dinámicas, que es justo lo que se pretende analizar. Mediante el empleo del análisis de componentes principales se dispone de un método numérico y fiable que identifique relaciones lineales entre el comportamiento de la temperatura del aire interior de las diferentes estancias.

4.3.1. ANÁLISIS DE LA HOMOGENEIDAD DEL CERRAMIENTO

La homogeneidad del cerramiento o su comportamiento respecto a lo esperado es lo que se pretende averiguar con este estudio. Resulta pertinente preguntarse si el análisis termográfico es una herramienta idónea para este tipo de análisis. Lo cierto es que, a falta de un sistema de calibración adecuado y en condiciones de intemperie este sistema no permite la evaluación térmica cuantitativa. Además, no permite discernir la relación existente entre la emisividad de la

superficie y otras características térmicas. De ese modo, lo que se espera de esta técnica es no encontrar diferencias significativas entre las diferentes partes del cerramiento. De ese modo se podrá concluir que no existe una diferencia muy notable.

Para la toma de termografías se dispone de una cámara de infrarrojos modelo FLIR SC600, que permite la realización de termografías con las que se puede comprobar de forma visual efectos térmicos muy destacados. Este sistema de medida tiene un rango de medida entre -40 y 1500 °C con un detector de Matriz de Plano Focal de 640×480 píxeles, microbolómetro no refrigerado. Presenta una respuesta espectral de 7.5 a 13.0 μm , una sensibilidad térmica inferior a 45mK a 30 °C y una precisión de la medida de ± 1 °C ó ± 1 % de la lectura de la medida de temperatura.

Las termografías se tomaron de la fachada sur al mediodía solar del 24 de febrero de 2012. Dada la imposibilidad de realizar una misma termografía para toda la fachada, ésta se termografió a trozos. En la figura 4.3 se presenta una de ellas.

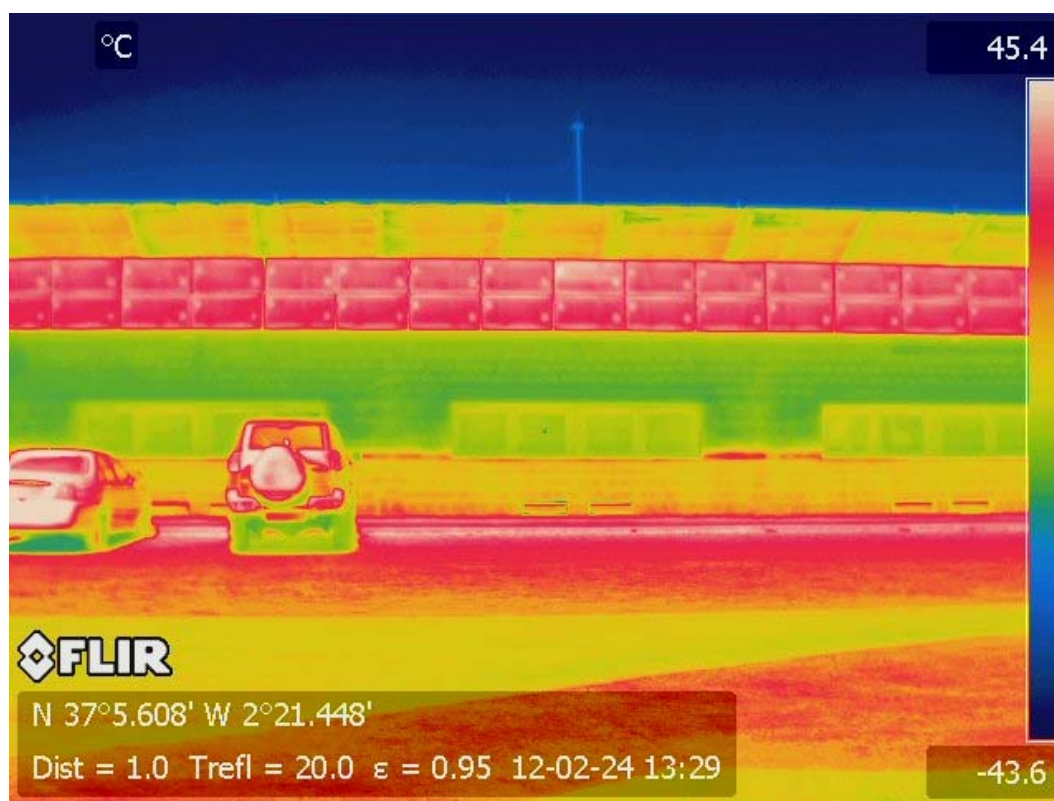


Figura 4.3. Termografía de la fachada sur del C-Ddl tomada a mediodía solar del 24 de febrero de 2012.

Se puede observar que en la zona central (verde) el cerramiento presenta un color homogéneo, con gradientes térmicos inferiores a 3 °C. La parte inferior del cerramiento presenta una temperatura más elevada, pero el efecto es debido a la radiación solar reflejada en ese instante, que también detecta la cámara. La mayor temperatura corresponde a los módulos fotovoltaicos integrados en el peto de sombreamiento y la menor temperatura corresponde al

cielo circundante. El resto de las termografías tomadas no se incluyen en la memoria, pero presentan un aspecto similar.

Así, desde el punto de vista cualitativo se puede concluir que las termografías tomadas a mediodía solar del 24 de febrero de 2012 no revelan grandes diferencias cualitativas en lo que a las propiedades de la fachada sur se refiere.

4.3.2. EVALUACIÓN DEL CONFORT TÉRMICO EN EL INTERIOR DE LOS RECINTOS

Los estudios relativos al confort térmico requieren de series temporales con un mínimo número de huecos en los periodos más representativos del comportamiento de un edificio en invierno y en verano. Por este hecho, de la serie completa de datos experimentales, se han seleccionado los periodos del invierno 2008-2009 (serie1), verano del 2009 (serie2) e invierno del 2009-2010 (serie3). Tanto el verano del 2010 como el invierno del 2010-2011 se han descartado por la presencia de un elevado número de huecos que mermaría la representatividad estadística de la muestra.

Las definiciones de los periodos invernales se pueden realizar en función de la geometría de la posición solar a través del año (solsticios y equinoccios) o bien mediante un análisis estadístico de las variables climáticas de la localidad bajo estudio. La definición de periodo invernal tomada para este estudio comprende desde el 15 de noviembre hasta el 15 de marzo. Asimismo, los periodos estivales se definen desde el 15 de mayo hasta el 15 de septiembre. Como segundo control de calidad de las series de datos experimentales se eliminan de la serie temporal los días en los que alguno de los sensores implicados en el estudio proporcionan una señal incorrecta.

En esta parte del trabajo se realiza una aproximación simple al tema del confort térmico, al ser este un concepto bastante subjetivo y difícil de analizar. Actualmente no existe ningún documento que imponga una banda de referencia que establezca lo que el Código Técnico de la Edificación (CTE) llama “bienestar térmico”, aunque si existen varios que hablan de valores óptimos de diseño. Uno de estos documentos es el cálculo de grados - día. En él se utilizan dos temperaturas base, que para el Sur de Europa son 18°C para invierno y 24°C para verano. En la normativa española existen o se hace referencia, a varios documentos que hablan de las condiciones óptimas de diseño en lo referente a confort térmico. Entre estos documentos destacan la norma ISO 7730, el Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE), o el propio CTE. En ellos se establecen unas bandas de diseño para alcanzar el bienestar térmico interior, tanto para verano como para invierno.

Según el RITE, la banda de confort térmico óptima para el verano oscila entre los 23 y los 25 °C y para el invierno oscila entre los 21 y los 23°C. Por ello, en esta evaluación se establece una banda de confort estival en torno a 24°C \pm 1 °C e invernal en torno a 22 °C \pm 1 °C, y se comparan con los valores obtenidos experimentalmente.

En primer lugar se representa la diferencia de temperaturas entre el interior de cada habitación y el exterior del edificio, frente a la temperatura ambiente. Estas gráficas muestran en su eje de ordenadas el calentamiento o enfriamiento efectivo y su distribución frente a la temperatura

exterior. Se les ha añadido una banda de confort térmico invernal en torno a $22\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ y estival en torno a $24\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$.

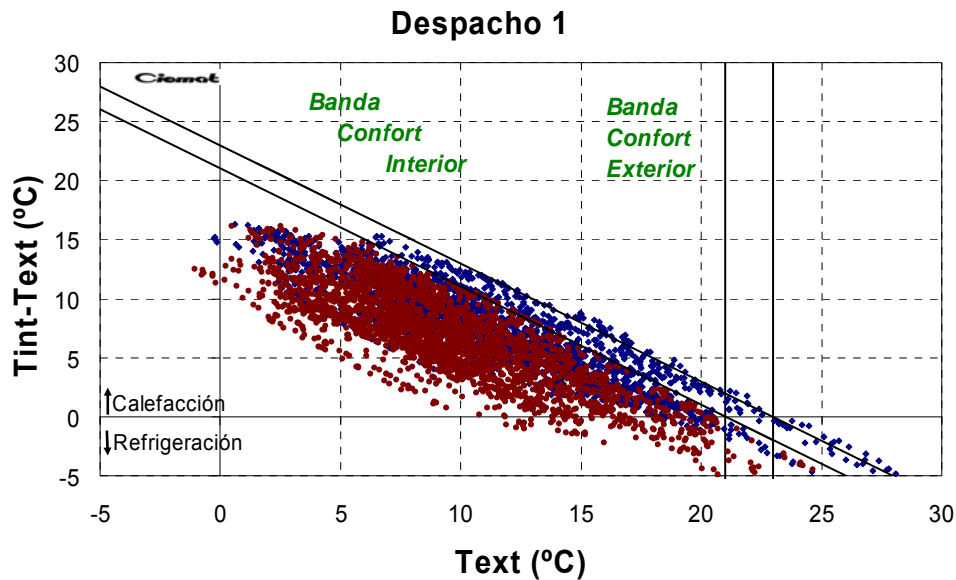


Figura 4.4. Comparación del calentamiento y del enfriamiento efectivo del despacho 1 para la serie 1 (granate) y la serie 3 (azul).

Las figuras 4.4 a 4.6 muestran la comparación entre las diferentes series invernales (series 1, granate, y 3, azul) para el despacho 1, el despacho 13 y el despacho de becarios, respectivamente. La comparación de las gráficas de cada despacho monitorizado muestra lo subjetivo y complicado que es analizar el confort, ya que cada individuo tiene un concepto diferente de "temperatura óptima". Se puede observar un fenómeno de aclimatación anual, ya que la segunda serie presenta valores más cercanos a la banda de confort.

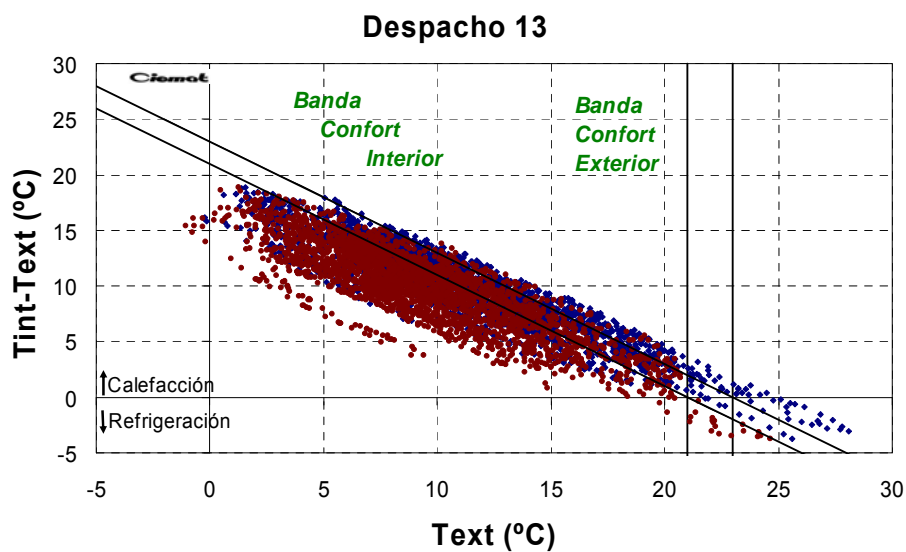


Figura 4.5. Comparación del calentamiento y del enfriamiento efectivo del despacho 13 para la serie 1 (granate) y la serie 3 (azul).

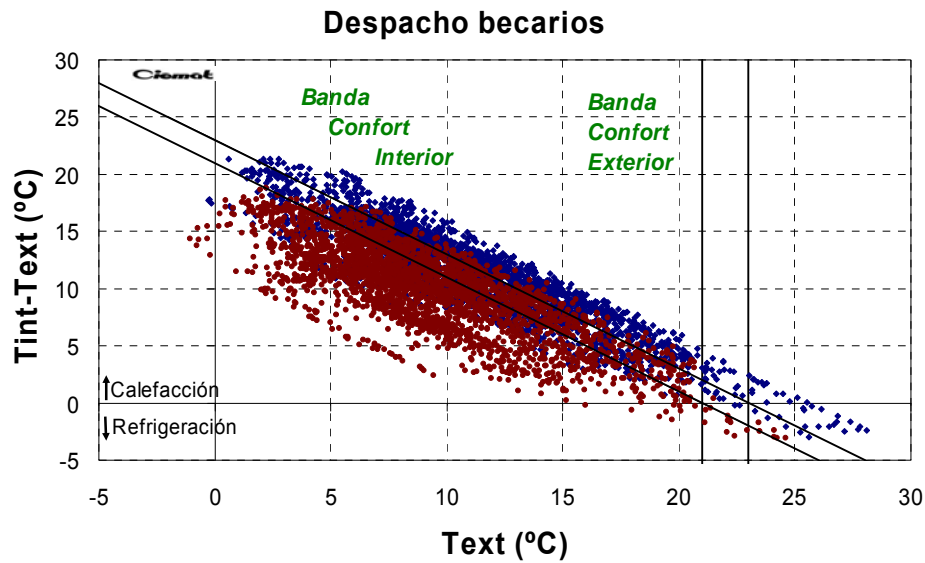


Figura 4.6. Comparación del calentamiento y del enfriamiento efectivo del despacho de becarios para la serie 1 (granate) y la serie 3 (azul).

La figura 4.7 muestra los valores para el periodo estival (serie 2). Los despachos muestran valores por encima de la banda de confort establecida. También se puede apreciar el hecho de que hayan colocado diferentes temperaturas de consigna en cada despacho.

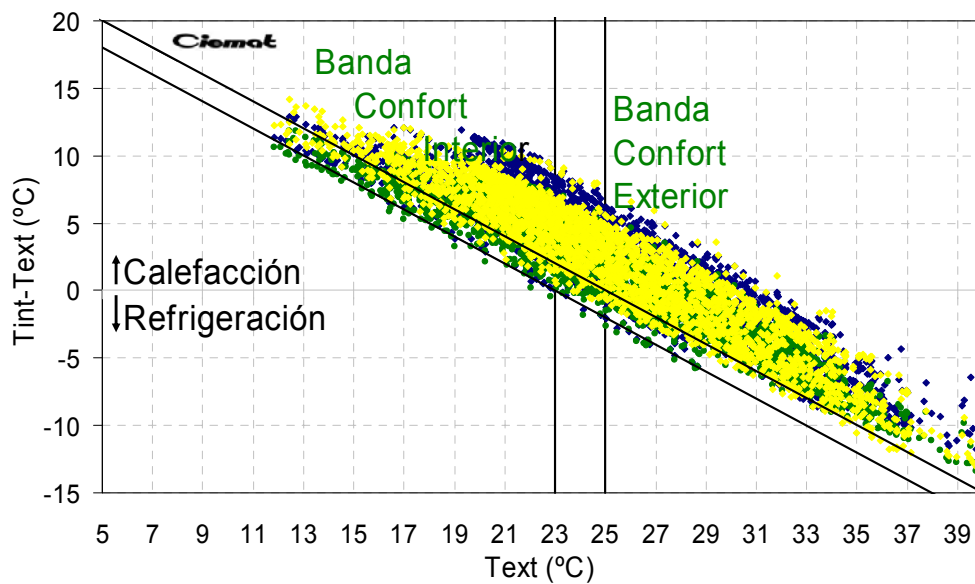


Figura 4.7. Calentamiento y enfriamiento efectivo en periodo estival. En azul el despacho 1, en verde el despacho 13 y en amarillo el de becarios

También es interesante analizar la evolución térmica de las estancias a lo largo de un día, observando cuándo y en qué momento se producen los máximos. Existen diferentes maneras para calcular el día más representativo de un periodo, pero la más extendida es el método del día tipo, donde se caracteriza cada estación mediante el día más representativo de la misma, para ello se recurre al cálculo de días tipo siguiendo la metodología Hall (Hall 1978), propuesta en el proyecto europeo Pascool (Palomo, 1995; Petrakis, 1996). Esta metodología tiene en cuenta la diferencia (α) entre los valores horarios y la media obtenida durante ese periodo de la temperatura media, máxima, mínima, su rango y la irradiancia solar global. Conocida esta diferencia, se realiza una suma ponderada, teniendo en cuenta los siguientes factores de ponderación (ω) de cada variable.

Irradiancia Solar Global $\rightarrow 12/24$

Valores medios de temperatura, velocidad viento y humedad $\rightarrow 2/24$

Valores máximos y mínimos de temperatura, velocidad viento y humedad $\rightarrow 1/24$

El día tipo, según esta metodología, se calcula como el valor mínimo del resultado de la operación $\sum \omega \cdot \alpha$.

En caso de no disponer de valores fiables de algunas de estas variables, se recurre a factores diferentes de ponderación cuya suma total, en todos los casos, debe ser 1. Por ejemplo, en el análisis llevado a cabo por el CIEMAT en el proyecto europeo MEDUCA (Heras, 2001; Heras, 2005), se tomaron como factores de ponderación los siguientes valores:

- Temperatura media $\rightarrow 0.4$
- Temperatura máxima/mínima $\rightarrow 0.1$
- Rango de temperaturas (Máxima-Mínima) $\rightarrow 0.1$
- Irradiancia Solar Global $\rightarrow 0.3$

La aplicación de esta metodología a las diferentes series de datos bajo estudio los días tipo resultantes son el 29 de enero, el 26 de junio y el 10 de diciembre de 2009 para los tres periodos, respectivamente. En las figuras 4.8 a 4.10 se representa la evolución de las temperaturas interiores junto a la temperatura del ambiente exterior para los diferentes periodos.

En las figuras se puede observar que en todos los periodos bajo estudio la amplitud de la oscilación de la temperatura interior es inferior a la de la temperatura exterior motivado por la inercia térmica. También se puede observar el efecto de los sistemas activos de climatización a primeras horas de la mañana, invirtiendo la tendencia natural que tendría la oscilación térmica interior en caso de que el C-DdI se encontrara en evolución libre. Asimismo, se puede observar que la temperatura del despacho 1 en los periodos invernales es inferior a las de los despachos 13 y del de los becarios, respectivamente, con valores por debajo de la franja de 20 °C en enero y próximos a 20 °C en diciembre. En el periodo estival es ligeramente superior. Este hecho puede reflejar que el usuario del despacho es menos exigente con el sistema de

climatización que el resto de los ocupantes. En este periodo las temperaturas interiores oscilan entre 26 y 28 °C, ligeramente superiores a la banda de confort térmico convencional. Asimismo, los porcentajes de humedad relativa interior registrados en los despachos se encuentran dentro de la franja de confort. Además, durante los periodos invernales, las humedades relativas interiores se encuentran dentro de la franja 30-40%, con humedades relativas exteriores cercanas al 70%. Durante el día tipo estival, tanto la humedad relativa interior como la exterior reducen sus valores a la franja 26-32% para el interior y 25-50% para el exterior, respectivamente.

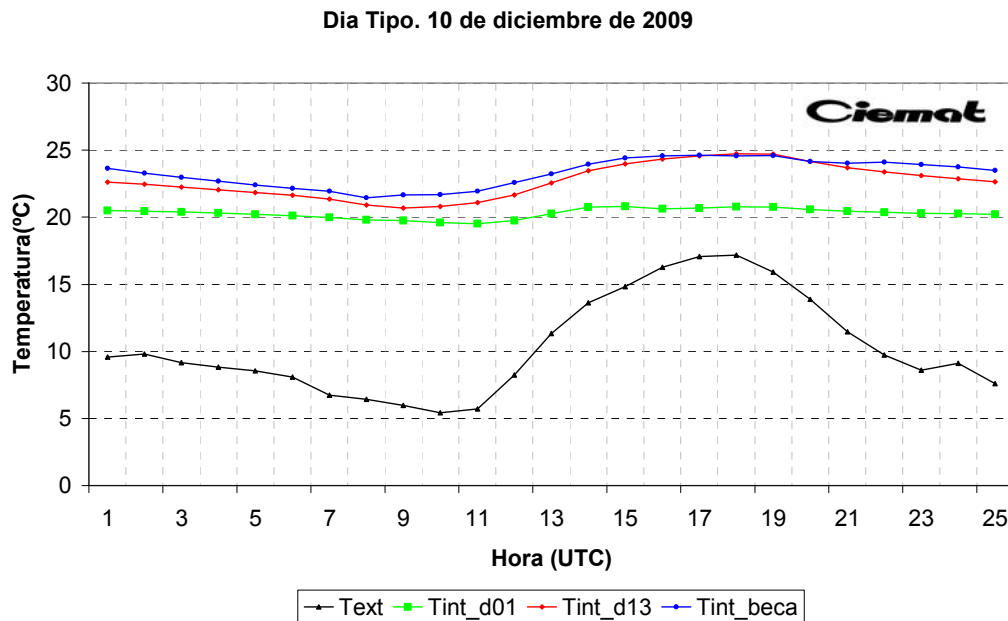


Figura 4.8. Evolución de las temperaturas en el día tipo de la serie 1.

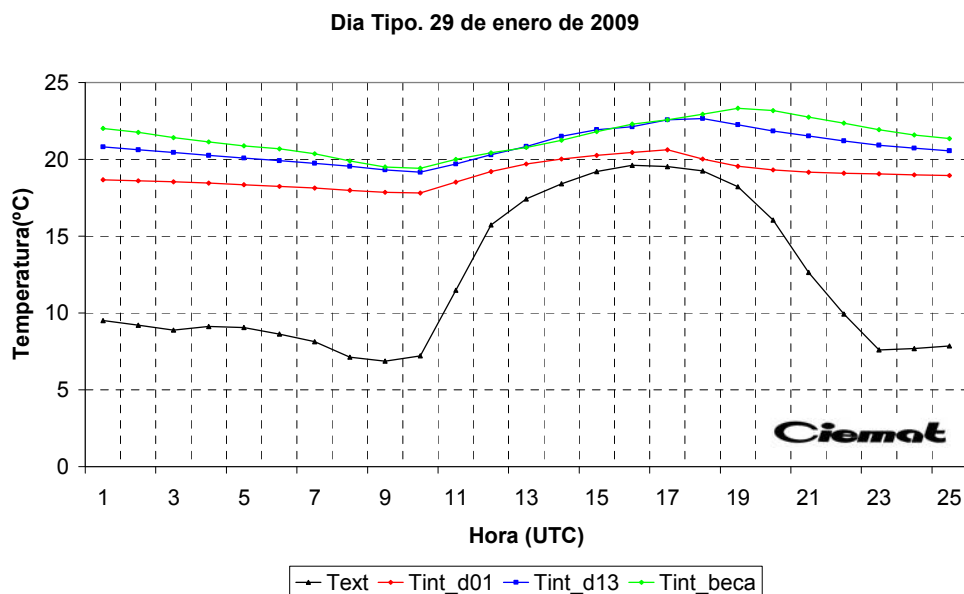


Figura 4.9. Evolución de las temperaturas en el día tipo de la serie 2.

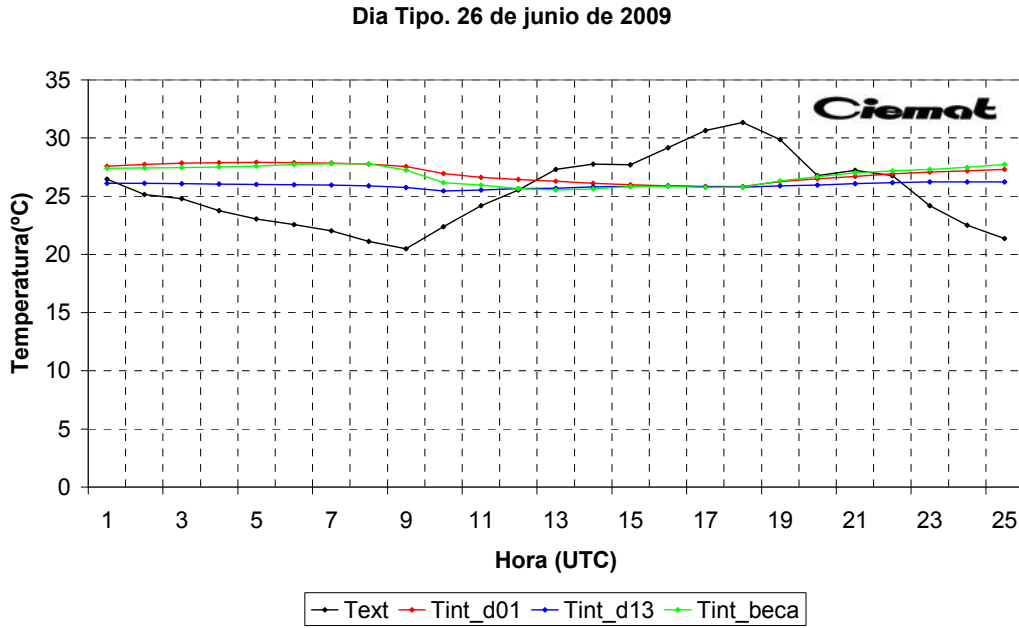


Figura 4.10. Evolución de las temperaturas en el día tipo de la serie 3.

La aparición de los sistemas de climatización suscitó un interés por la valoración del nivel de confort térmico. Su principal objetivo era lograr que las personas se sintieran confortables, precisando métodos que permitieran evaluar en qué medida se alcanzaba este fin. Existen numerosos índices propuestos: temperatura efectiva (ET), temperatura resultante (RT), índice de presión de calor (HSI), etc, pero el más extendido y usado es el Método Fanger (PMV).

En 1970, Fanger propuso en su publicación "Thermal Comfort", un método de valoración considerando casi todas las variables que influyen en los intercambios térmicos hombre-medio ambiente y que, por tanto, contribuyen a la sensación de confort. La ecuación de confort propuesta depende de las características ambientales (de la temperatura de bulbo seco, de la temperatura radiante media, de la humedad relativa y de la velocidad del aire), de las características de la vestimenta y de las características del tipo de trabajo y del nivel de actividad.

Este índice se calcula teniendo en cuenta los fenómenos físicos de transferencia de calor entre el hombre y el medio que le rodea, junto a una aproximación empírica para la caracterización de la sensación térmica. Es recogido por diversas normas, como ISO 7730 y la Norma Técnica Española de Prevención número 74 (NTP, 74). La ecuación que proporciona el índice PMV viene dada por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 PMV = & (0.303e^{-0.036M} + 0.028) * \{ (M - W) - 3.05 \cdot 10^{-3} * [5733 - 6.99(M - W) - p_a] \\
 & - 0.42 * [(M - W) - 58.15] - 1.7 \cdot 10^{-5} M (5867 - p_a) - 0.0014M (34 - t_a) \\
 & - 3.96 \cdot 10^{-8} f_{cl} * \left[(t_{cl} + 273)^4 - \left(\bar{t}_r + 273 \right)^4 \right] - f_{cl} h_{cl} (t_{cl} - t_a) \}
 \end{aligned} \quad (ec \ 4.1)$$

Donde:

PMV = Voto Medio Previsto.

M = Tasa Metabólica (W/m^2). Donde 1a unidad metabólica se define como Met y es equivalente a $58 W/m^2$.

W = Trabajo externo (W). Nulo para la mayoría de las actividades.

p_a = Presión parcial del vapor de agua (Pa).

t_a = Temperatura del aire ($^{\circ}C$).

f_{cl} = Relación entre la superficie del hombre vestido y desnudo.

t_{cl} = Temperatura superficial de la vestimenta ($^{\circ}C$).

t_r = Temperatura radiante media ($^{\circ}C$).

h_{cl} = Coeficiente de transferencia de calor por convección ($W/m^2^{\circ}C$)

Esta ecuación da como resultado un Nivel de Sensación Térmica (NST), tal y como se observa en la tabla 4.2.

SENSACIÓN	VALOR
Ambiente Muy Frío	-3
Ambiente Frío	-2
Ambiente Fresco	-1
Ambiente Neutro	0
Ambiente Templado	+1
Ambiente Caliente	+2
Ambiente Muy Caliente	+3

Tabla 4.2. Nivel de Sensación Térmica.

Aunque la escala de sensación térmica oscila entre -3 y +3, se recomienda utilizar sólo los valores comprendidos entre -2 y +2.

Existen múltiples maneras de resolver esta ecuación, pero la norma ISO 7730 propone tres procedimientos: métodos iterativos, tabulaciones de la ecuación o emplear instrumentación que directamente ofrezca la medida de dicho índice. Se ha empleado el método iterativo para, que a partir de los valores interiores de los dos despachos y considerando una serie de hipótesis, obtener los valores del Índice del Valor Medio. Los valores de entrada al modelo son:

- Vestimenta de invierno: 0.9 clo debido a la vestimenta + 0.15 clo debido a la resistencia de la silla.

- Vestimenta de verano: 0.5 clo debido a la vestimenta + 0.15 clo debido a la resistencia de la silla.
- Tipo de Actividad: Sedentaria= 1.
- Nivel de actividad: Actividad sedentaria (oficina, laboratorio,..) = 1.2 Met .
- Velocidad del viento interior: 0.1 m/s.

Los valores de vestimenta se proporcionan en ‘clo’, unidad de medida de la resistencia térmica de la vestimenta equivalente a una resistencia térmica de 0,18 m² hr °C/Kcal.

En las figuras 4.11 a 4.13 se muestran los niveles de de Sensación Térmica de Fanger obtenidos para los despachos bajo estudio, y para todos los datos experimentales de las series consideradas:

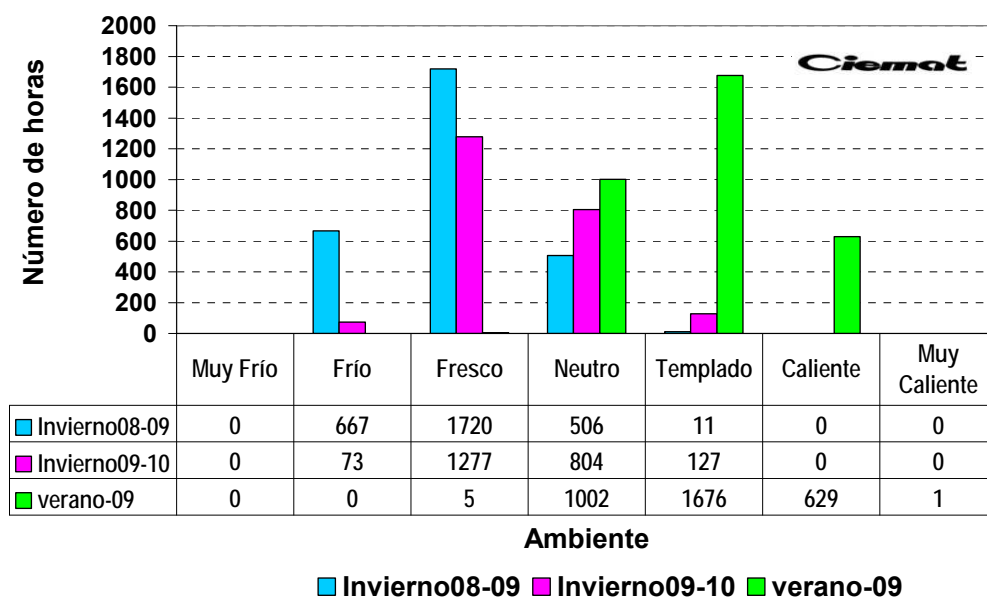


Figura 4.11. Niveles de Sensación Térmica de Fanger del despacho 1.

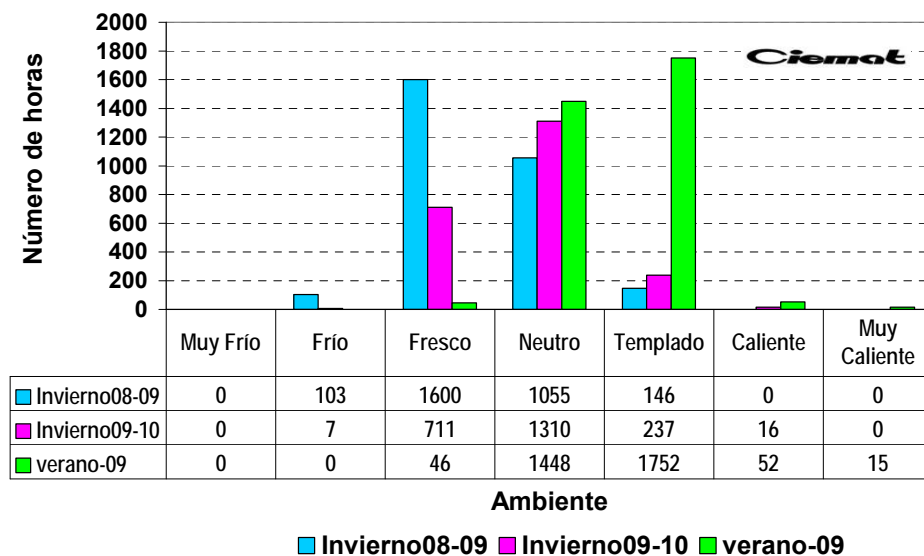


Figura 4.12. Niveles de Sensación Térmica de Fanger del despacho 13.

En el despacho 1 se observa que la mayoría del tiempo se encuentra en un ambiente fresco en invierno y templado en verano. En el despacho 13 se encuentra que el primer periodo invernal es más severo que el segundo periodo invernal, probablemente debido a que el edificio llevaba más tiempo en uso y se acerca más a su régimen de funcionamiento normal. En el periodo estival el ambiente se puede calificar de templado prácticamente todas las horas del día.

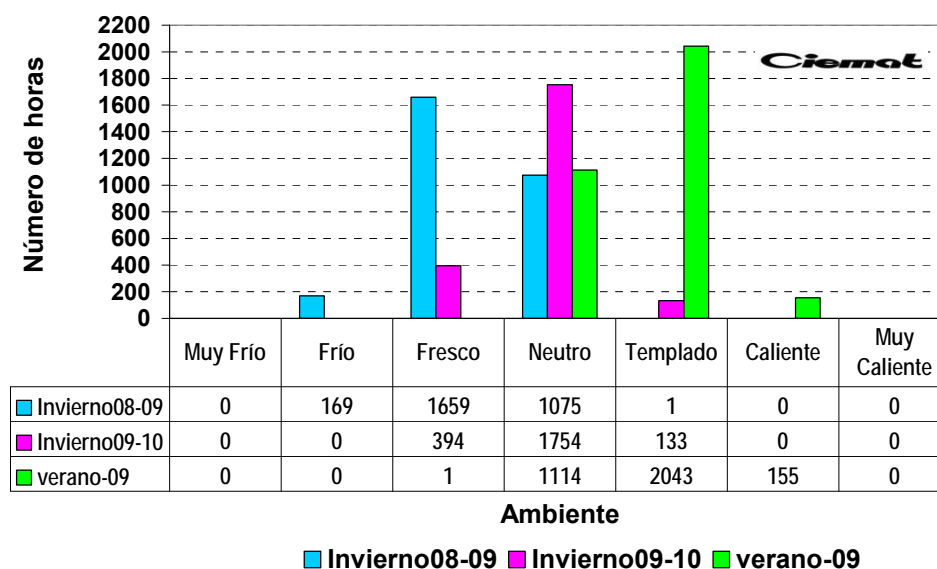


Figura 4.13. Niveles de Sensación Térmica de Fanger para el despacho de becarios.

En el despacho de los becarios la situación es similar, con un comportamiento en el segundo invierno algo más moderado que en el primero, lo que apoya la hipótesis de que el funcionamiento del edificio lo acerca a los criterios de diseño. En este caso también se observa el hecho de que los inviernos son ambientes frescos y los veranos templados.

No obstante, el anterior análisis se ha realizado para todas las horas del día, independientemente de la ocupación real del C-DdI. Por ello, se han realizado los análisis suponiendo un periodo de ocupación de 7 a 18 h, incluyendo sólo esos valores. Además, dado que se dispone de medidas de concentración de dióxido de carbono en el interior de las estancias se ha supuesto que un despacho se encuentra ocupado si la diferencia entre la concentración interior y la exterior es mayor de 50ppm. La figura 4.14 muestra los histogramas resultantes tras realizar estos análisis para el despacho 1, para la serie 3 junto a los datos numéricos relativos a ellos.

Se puede observar que el porcentaje de tiempo que se encuentra en la zona neutra aumenta notablemente cuando se tiene en cuenta solamente el periodo de ocupación. Aumenta aún más el porcentaje cuando la ocupación, además, es real, aumentando en ocasiones hasta el 100% de los datos si se acepta la banda de pseudoconfort. Es conveniente recalcar que la incertidumbre asociada a los sensores es elevada comparada con el umbral seleccionado. No obstante, el riesgo que se asume es el de introducir datos de no ocupación como datos de

ocupación, por lo que los resultados a mayor precisión deberían mejorar aún más. Las series para las otras series temporales y las otras estancias no se representan aquí, pero presentan los mismos patrones que el caso estudiado.

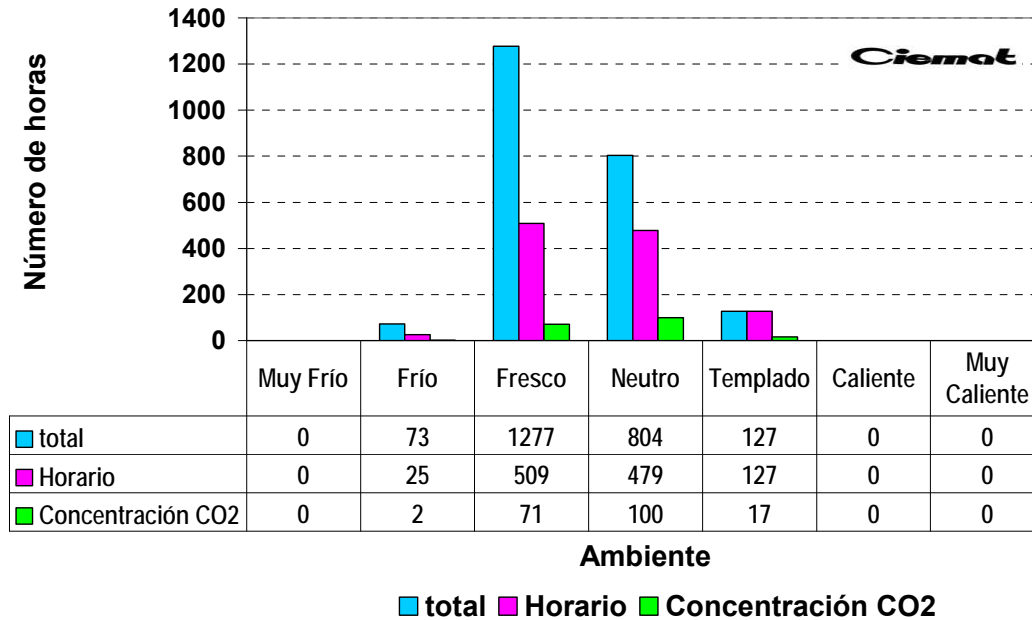


Figura 4.14. Niveles de Sensación Térmica de Fanger para el despacho 1 y la serie 3 en función de los niveles de ocupación.

Aunque el IMV cuantifica el grado de confort térmico de una situación dada, es necesario relacionar estos parámetros con los Porcentajes de Personas satisfechas o Insatisfechas con dicho ambiente (PPD). Esta correlación quedó establecida por Fanger a través de un estudio estadístico realizado a 1300 personas expuestas durante tres horas a un ambiente determinado. La norma ISO 7730 ofrece una ecuación para calcular el PPD a partir del PMV:

$$PPD = 100 - 95 * e^{-\left(0.03353 * PMV^4 + 0.2179 * PMV^2\right)}, \text{ (ec 4.2)}$$

Los resultados obtenidos por Fanger para el cálculo del Porcentaje Previsto de Personas Insatisfechas (PPD), queda reflejado en la figura 4.15. En dicha imagen se observa que a pesar de alcanzar un ambiente neutro (PMV=0), el porcentaje de insatisfechos es del 5%. Este valor indica que siempre existe un número de usuarios que no alcanzan el estado de confort a pesar de tener las características climáticas adecuadas para ello. Cuando el PMV oscila entre -2 y +2, el porcentaje de insatisfechos aumenta hasta casi un 80%. La interpretación de todos estos valores denota lo complicado y subjetivo que resulta cuantificar el nivel de confort térmico. De esta explicación se puede deducir que una vez obtenido el PMV para una serie de despachos, el análisis de personas en disconfort se puede calcular automáticamente.

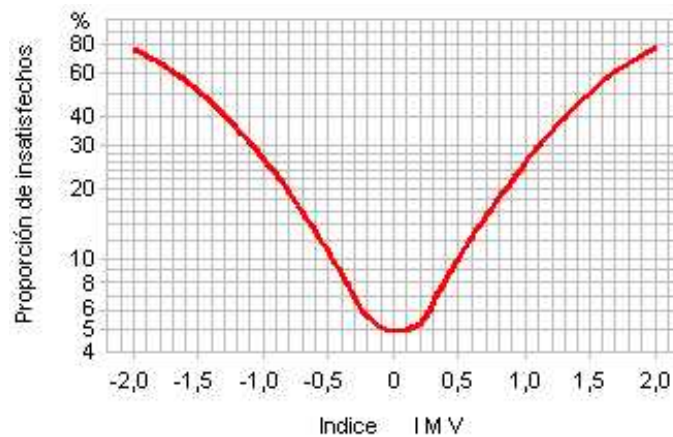


Fig.4.15. Proporción prevista de personas insatisfechas en función del PMV.

Así, se ha empleado un criterio de selección que maximiza la fiabilidad en la serie de datos experimentales, se ha evaluado el confort térmico de las tres estancias seleccionadas tanto desde el punto de vista del calentamiento efectivo como mediante el cálculo detallado del Índice de valoración medio y se ha indicado el modo de trasladarlo al porcentaje de insatisfechos desde el punto de vista térmico. Se ha calculado un día tipo y se ha analizado la evolución de las temperaturas. También se ha empleado una variable de selección como es la concentración interior de CO₂ como variable discriminatoria en el análisis de confort. Se puede concluir, entonces, que **las estancias seleccionadas cumplen los criterios de confort exigidos a una edificación y son, en ese aspecto, representativo del régimen de operación para el que ha sido diseñado el C-Ddl.**

4.3.3. USO RELATIVO A OTRAS ESTANCIAS: ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Una vez demostrado que las estancias seleccionadas se encuentran dentro de los márgenes establecidos de confort térmico cabe preguntarse si el resto de las estancias se comportan del mismo modo. Para ello se requiere de información adicional sobre el resto de las estancias, concretamente de sus temperaturas de aire interior. Disponiendo de las temperaturas en cada uno de los despachos, aunque se trate de un periodo relativamente corto, como por ejemplo una o dos semanas, se puede tratar de averiguar numéricamente si representan el mismo patrón. Para ello, se obtiene una combinación lineal de todas las señales de temperatura de forma que sea ésta la más representativa. Si todos los despachos contribuyen por igual a dicha señal transformada podrá concluirse que la medición de varias de dichas señales aporta información suficiente sobre la señal común y representativa de todas ellas. En una forma matemática, se trata de transformar un espacio de datos multivariable en un subespacio de menor dimensión que preserve la máxima varianza del conjunto original de los datos.

La técnica empleada en este trabajo para abordar dicho problema se conoce como Análisis de Componentes Principales. Fue desarrollada hace más de cien años por Pearson (Pearson,

1901) y, según el campo de aplicación que se consulte adopta diferentes nombres como Descomposición en Valores Singulares o Descomposición de Karhunen-Loève (Hotteling, 1933; Karhunen, 1946; Loève, 1955). Este tipo de técnicas se ha vuelto una herramienta muy empleada en el reconocimiento de patrones en grandes conjuntos de datos (minería de datos, data mining), técnicas de agrupamiento (clustering) o procesamiento de imágenes para compresión y reconocimiento de patrones.

Para emplear esta técnica se construye a partir del vector de señales, T , una matriz similar a la de covarianza de las señales:

$$W = \int T(t)T'(t)dt, \text{ (ec 4.3)}$$

Cuyos elementos diagonales representan la varianza de las propias señales y los elementos fuera de la diagonal las relaciones existentes entre las diferentes parejas de señales. La descomposición espectral de W dará lugar a un conjunto de n autovectores ortonormales (V), siendo n la dimensión de T . Entonces, W se podrá escribir:

$$W = VDV, \text{ con } D = \text{diag}[d_1^2 \dots d_n^2], \text{ (ec 4.4)}$$

siendo d_j el autovalor j , que se habrán ordenado decrecientemente por conveniencia.

Dado que V es un conjunto ortonormal en R_n , el vector T admite descomposición lineal en diferentes términos como sigue:

$$T_k(t) = \sum_{m=1}^n v_{km} z_m(t), \text{ (ec. 4.5)}$$

Al conjunto $z_m(t)$ se le denomina coeficientes de descomposición y v_{km} es el elemento (k,m) de la matriz V . Al producto $v_{km} z_m(t)$ se le denomina la m -ésima componente principal de $T_k(t)$. En forma matricial:

$$T(t) = VZ(t), \text{ (ec. 4.6)}$$

A la que se le denomina descomposición en valores singulares de $T(t)$. Se puede demostrar que la varianza de la señal $T_k(t)$ es:

$$w_{kk} = \sum_{m=1}^n v_{km}^2 d_m^2, \text{ (ec. 4.7)}$$

Con lo que la contribución de la m-esima componente principal de la señal $T_k(t)$ a la energía total vendrá dada por:

$$c_{km} = \frac{v_{km}^2 d_m^2}{w_{kk}}, (ec. 4.8)$$

Al conjunto de los coeficientes $\{c_{km}\}_{m=1,\dots,n}$ se les denomina el espectro de la descomposición en valores singulares de $T_k(t)$. Si dos señales presentan espectros similares, es que se están comportando de forma muy parecida.

Para realizar el análisis de componentes principales se instalaron sensores portátiles adicionales en el resto de las estancias del C-Ddl y se realizaron campañas de monitorización de menor duración, mediante medidores autónomos marca ONSET modelo HOBO U10-001 para medida de temperatura y modelo HOBO U10-003 para medida de temperatura y humedad. Es conveniente destacar en este punto que este tipo de sensores requieren de un mayor esfuerzo técnico para la adquisición de datos, pues deben ser programados manualmente uno a uno y deben desinstalarse para la descarga manual de los datos, uno a uno. Para el análisis de componentes principales se seleccionaron dos periodos, correspondientes a febrero (del 4 al 16) y junio (del 18 al 25) de 2011, correspondientes a situaciones de calefacción y refrigeración en el interior del C-Ddl, respectivamente. Por falta de sensores, los despachos 5 y 11 del C-Ddl no fueron monitorizados durante dichos periodos. En cualquier caso, se dispone de 20 de las 22 señales representativas del edificio.

	C20	C19	C18	C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11
d_1	2.00E-09	1.75E-10	2.20E-08	2.55E-08	1.10E-09	1.09E-07	2.77E-07	7.23E-09	1.74E-05	1.77E-06
d_2	2.11E-10	5.02E-10	1.29E-08	3.49E-08	4.35E-08	5.26E-08	4.30E-07	8.65E-07	1.95E-05	3.10E-06
d_3	1.18E-09	1.30E-10	5.63E-08	6.06E-09	8.78E-08	5.04E-09	1.66E-06	8.79E-07	4.76E-07	4.35E-07
d_4	3.28E-11	1.66E-10	2.25E-08	1.12E-08	2.89E-08	1.42E-08	3.41E-10	4.68E-08	6.65E-12	1.48E-07
d_6	1.03E-08	2.62E-09	2.81E-08	6.00E-08	9.33E-10	1.42E-06	8.51E-08	1.82E-09	8.43E-08	2.13E-06
d_7	1.47E-10	5.07E-12	7.29E-09	9.18E-09	4.46E-09	1.21E-07	1.59E-08	1.55E-08	4.32E-10	2.02E-07
d_8	8.81E-09	8.81E-09	1.88E-07	6.89E-08	2.41E-07	1.89E-07	2.73E-07	8.22E-08	1.42E-08	6.16E-09
d_9	8.50E-12	2.10E-09	9.68E-08	1.32E-07	1.58E-07	8.38E-08	6.96E-07	7.33E-06	1.79E-06	9.28E-07
d_10	4.24E-11	4.11E-08	7.87E-09	5.63E-07	1.04E-07	9.17E-07	4.95E-08	5.15E-10	3.41E-07	2.41E-09
d_12	6.22E-08	4.80E-08	2.63E-09	4.31E-07	3.08E-07	5.05E-07	1.49E-09	1.41E-07	8.96E-07	3.36E-06
d_13	2.53E-08	3.39E-08	7.56E-08	5.95E-08	6.04E-08	2.82E-10	9.07E-07	5.39E-09	1.01E-07	1.02E-05
d_14	1.42E-09	1.20E-07	1.71E-13	7.16E-09	1.16E-07	9.57E-07	7.36E-07	6.97E-09	2.17E-06	3.70E-07
d_15	2.08E-08	1.84E-08	6.85E-08	4.59E-07	8.03E-07	1.90E-09	8.73E-08	2.16E-08	3.42E-06	1.77E-05
d_16	9.63E-10	1.69E-08	2.88E-09	1.31E-07	1.02E-06	3.50E-10	1.32E-07	2.12E-06	2.45E-08	3.40E-06
d_17	4.18E-08	7.25E-09	3.99E-07	8.80E-10	2.64E-07	5.74E-09	2.48E-06	1.72E-07	1.87E-07	3.46E-07
d_18	7.18E-10	2.58E-10	1.51E-08	8.51E-08	2.66E-08	6.56E-08	7.61E-08	1.63E-06	2.04E-06	4.24E-06
Becarios	2.82E-13	6.08E-10	3.52E-10	3.95E-10	5.70E-08	1.36E-08	1.18E-08	6.13E-07	1.01E-09	5.24E-07
Descanso	9.55E-12	3.87E-12	2.93E-11	1.09E-09	1.19E-10	2.08E-11	2.56E-09	2.08E-08	3.07E-08	9.08E-09
Auditorio	3.25E-10	4.36E-08	1.35E-06	1.06E-07	3.66E-07	3.04E-06	4.62E-07	4.09E-06	1.61E-07	2.72E-06
Reuniones	4.57E-10	4.59E-11	1.96E-08	5.39E-09	6.21E-08	2.20E-07	4.15E-07	6.55E-06	1.13E-05	1.06E-05
Máximo	6.22E-08	1.20E-07	1.35E-06	5.63E-07	1.02E-06	3.04E-06	2.48E-06	7.33E-06	1.95E-05	1.77E-05

Tabla 4.3. Diez últimos valores singulares de todas las estancias en la serie de junio

En las tablas 4.3 y 4.4 se presentan los valores para el espectro de valores singulares para las veinte estancias y en la serie de junio.

En la última de las filas de las tablas se presenta el valor máximo para cada uno de los valores singulares de las componentes de todas las estancias. La diferencia entre el primer valor singular y el resto es de más del 99%, lo que es un claro indicativo de que el comportamiento del conjunto de todas las estancias puede ser representada fielmente por una única combinación lineal del comportamiento dinámico de cada una de ellas. Esto es, una única componente principal rige el comportamiento dinámico (o los fenómenos dinámicos) de todo el sistema con una precisión aceptable.

	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
d_1	3.50E-06	1.16E-05	2.33E-05	1.46E-04	1.43E-04	1.16E-04	2.91E-04	2.38E-03	7.90E-03	9.89E-01
d_2	1.05E-06	2.31E-06	2.79E-06	2.14E-04	7.34E-05	8.72E-05	4.21E-03	3.98E-04	1.39E-05	9.95E-01
d_3	1.71E-06	1.96E-06	9.10E-07	5.08E-06	6.93E-06	3.60E-05	7.44E-05	5.12E-05	1.31E-03	9.99E-01
d_4	1.30E-06	6.05E-07	1.26E-05	7.62E-08	1.58E-08	2.09E-04	2.75E-05	1.29E-05	1.46E-03	9.98E-01
d_6	3.98E-07	4.01E-06	8.97E-07	1.42E-08	3.73E-07	3.10E-06	1.37E-04	3.03E-05	1.09E-03	9.99E-01
d_7	2.35E-07	6.12E-07	6.14E-06	2.10E-05	2.00E-04	1.02E-04	3.51E-06	8.06E-05	2.91E-03	9.97E-01
d_8	3.59E-06	5.98E-07	1.78E-06	1.21E-06	1.10E-06	3.30E-06	1.13E-05	9.63E-05	1.32E-03	9.99E-01
d_9	4.79E-06	5.88E-05	2.09E-06	1.21E-09	5.30E-05	1.53E-05	8.37E-04	2.31E-04	9.16E-04	9.98E-01
d_10	1.43E-07	2.34E-05	2.97E-07	2.36E-06	1.02E-05	4.30E-06	2.03E-04	5.79E-05	9.34E-05	1.00E+00
d_12	2.32E-07	6.95E-06	1.33E-05	1.42E-05	2.18E-05	1.34E-04	5.06E-04	1.72E-05	8.29E-07	9.99E-01
d_13	2.24E-06	1.49E-05	3.06E-06	3.55E-05	3.52E-05	7.11E-05	9.39E-05	2.69E-04	9.14E-04	9.99E-01
d_14	2.64E-07	2.35E-07	9.88E-07	1.52E-05	2.96E-05	2.64E-05	1.95E-04	3.68E-04	4.79E-04	9.99E-01
d_15	2.35E-07	9.68E-08	1.68E-07	9.14E-06	1.54E-04	4.20E-05	2.17E-06	2.17E-04	2.83E-05	1.00E+00
d_16	1.01E-05	2.42E-05	2.65E-06	3.28E-06	2.18E-05	1.01E-04	7.25E-05	2.16E-04	1.56E-05	1.00E+00
d_17	1.06E-06	4.69E-07	2.20E-06	6.88E-06	5.08E-05	1.55E-04	4.13E-04	3.41E-07	5.56E-04	9.99E-01
d_18	1.78E-05	2.58E-05	9.63E-08	7.73E-06	5.47E-05	2.50E-04	4.78E-04	6.97E-07	3.52E-03	9.96E-01
Becarios	2.23E-06	8.44E-07	8.48E-05	4.53E-06	4.88E-05	7.38E-06	1.75E-05	1.85E-04	2.06E-03	9.98E-01
Descanso	1.49E-09	4.86E-07	1.28E-07	1.47E-06	6.97E-07	4.21E-08	3.68E-05	1.62E-05	6.28E-02	9.37E-01
Auditorio	6.48E-06	5.98E-04	9.72E-07	2.81E-04	7.21E-03	2.55E-05	6.59E-04	2.54E-01	6.25E-02	6.74E-01
Reuniones	1.35E-06	5.90E-06	2.24E-08	8.30E-05	3.34E-05	9.19E-05	4.67E-03	2.12E-04	6.55E-05	9.95E-01
Máximo	1.78E-05	5.98E-04	8.48E-05	2.81E-04	7.21E-03	2.50E-04	4.67E-03	2.54E-01	6.28E-02	1.00E+00

Tabla 4.4. Diez últimos valores singulares de todas las estancias en la serie de junio

Para analizar la situación con mayor detalle se han de estudiar las componentes principales de cada una de las estancias. En la figura 4.16 se representan gráficamente los valores de las cuatro primeras componentes para todos los recintos monitorizados en esta campaña. Se puede observar que la primera de las componentes (C1, eje de la derecha) es claramente dominante en el patrón de comportamiento de todas las estancias. Los tres siguientes (C1, C2 y C3, eje de la derecha) toman valores netamente inferiores al primero. Las estancias en las que hay mayores diferencias son la sala de descanso (des) y el auditorio (audit.). Este hecho es debido a que el uso de estas estancias es más esporádico, lo que detecta el análisis de componentes principales. Se pueden hacer, entonces, dos grupos de estancias según su dinámica térmica. Los despachos orientados al sur y la sala de becarios por un lado y las salas de uso esporádico, como son la sala de descanso, el auditorio y la sala de reuniones por otro. Si se repite el análisis incluyendo esta vez sólo los despachos orientados al sur y la sala de becarios se comprueba que los resultados apuntan aún más hacia una única componente principal dominante en el patrón de comportamiento térmico de los despachos. La tabla 4.5 muestra los resultados para los valores singulares de cada una de las componentes de cada una de los despachos incluidos en el análisis. Nótese que en este caso solamente tenemos 17 componentes, igual número que el de despachos incluidos en el análisis. La distancia entre las primeras componentes principales y el resto se acrecenta.

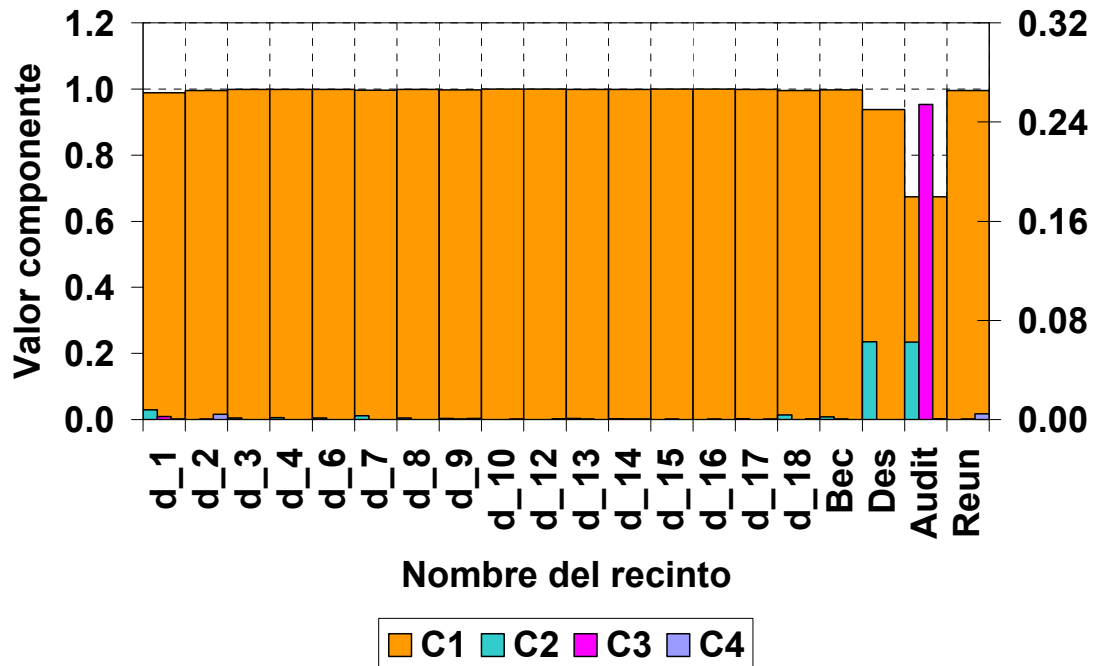


Figura 4.16. Valores singulares de los cuatro primeros componentes para todas las estancias del C-Ddl para la serie de junio. El primero de ellos se representa en el eje de la izquierda y los restantes en el eje de la derecha.

En la figura 4.17 se representan gráficamente los valores de los dos valores singulares asociados a las dos primeras componentes para todos los despachos incluidos en el nuevo análisis.

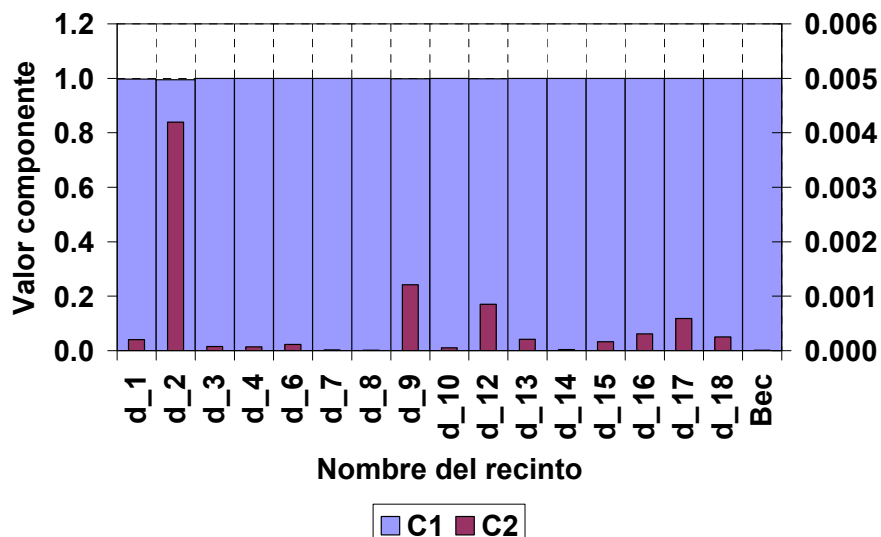


Figura 4.17. Valores singulares de las dos primeras componentes para los despachos orientados al sur y la sala de becarios del C-Ddl. La primera de ellas se representa en el eje de la izquierda y la segunda en el eje de la derecha.

La situación de la figura es, ahora, manifiestamente homogénea. Todos los despachos seleccionados presentan una componente principal dominante y una segunda componente que representa ligeras variaciones en el comportamiento de cada uno de ellos. Dichas variaciones se encuentran en menos del 0.5% de los casos.

	C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9
d_1	3.50E-09	1.78E-09	4.03E-08	2.54E-08	5.17E-10	1.06E-07	1.30E-06	8.46E-06	4.21E-06
d_2	1.31E-10	2.56E-09	3.28E-08	1.30E-09	2.22E-07	3.29E-07	7.35E-07	1.82E-05	3.01E-06
d_3	1.29E-09	2.37E-09	2.35E-08	1.29E-09	1.08E-07	2.47E-06	1.79E-08	1.76E-06	1.25E-06
d_4	2.94E-11	1.19E-09	1.43E-09	1.73E-09	1.14E-07	7.19E-09	1.14E-08	3.98E-08	5.59E-07
d_6	1.40E-08	2.52E-09	4.89E-09	1.94E-07	8.67E-07	1.44E-07	8.97E-07	2.99E-07	3.66E-08
d_7	2.80E-10	3.03E-10	1.28E-08	9.96E-10	6.01E-08	2.24E-08	1.57E-07	1.58E-10	1.28E-09
d_8	1.18E-08	2.74E-09	2.26E-08	6.49E-07	1.93E-08	2.77E-07	1.92E-06	1.87E-07	3.23E-06
d_9	4.75E-11	2.00E-10	8.31E-07	4.62E-08	6.52E-09	5.60E-08	5.92E-06	3.75E-06	6.81E-06
d_10	2.37E-10	4.72E-08	8.96E-07	8.53E-08	2.11E-07	1.51E-08	1.09E-06	1.12E-06	1.24E-08
d_12	7.54E-08	6.29E-08	4.26E-07	6.75E-07	2.82E-07	6.16E-09	1.51E-08	7.72E-07	2.23E-06
d_13	3.01E-08	5.85E-08	9.16E-08	5.27E-08	2.15E-08	1.06E-06	5.30E-09	6.97E-07	1.09E-05
d_14	1.06E-09	1.45E-07	2.23E-08	1.19E-07	1.36E-07	8.50E-07	6.10E-07	3.43E-06	6.48E-08
d_15	2.93E-08	3.60E-08	6.64E-07	3.48E-07	9.65E-07	2.03E-10	3.28E-06	8.44E-07	9.76E-06
d_16	3.22E-09	2.03E-08	7.46E-08	5.78E-07	6.43E-07	3.20E-08	1.26E-06	2.56E-06	2.07E-05
d_17	5.50E-08	3.59E-08	1.93E-07	1.45E-08	7.64E-07	2.90E-06	2.08E-06	2.44E-06	4.61E-07
d_18	2.13E-09	5.59E-11	1.61E-07	8.28E-10	6.94E-08	3.35E-07	5.03E-08	2.00E-06	1.30E-06
Bec	3.17E-12	7.35E-10	2.57E-09	4.90E-08	1.73E-09	7.76E-08	1.91E-07	1.13E-07	1.56E-06
Máximo	7.54E-08	1.45E-07	8.96E-07	6.75E-07	9.65E-07	2.90E-06	5.92E-06	1.82E-05	2.07E-05

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
d_1	1.05E-06	4.79E-06	3.64E-05	4.71E-04	1.79E-05	1.74E-03	2.04E-04	9.98E-01
d_2	7.03E-07	1.91E-08	6.25E-05	2.47E-04	4.17E-04	3.29E-05	4.20E-03	9.95E-01
d_3	1.68E-06	1.39E-06	1.46E-05	4.97E-07	1.84E-05	2.30E-05	7.83E-05	1.00E+00
d_4	2.77E-06	1.12E-05	1.32E-06	3.46E-06	2.01E-04	3.23E-06	7.09E-05	1.00E+00
d_6	2.50E-06	1.57E-06	3.67E-06	1.47E-05	5.56E-07	2.80E-06	1.15E-04	1.00E+00
d_7	1.76E-06	1.48E-05	1.27E-07	1.18E-04	5.28E-05	3.27E-04	1.85E-05	9.99E-01
d_8	3.28E-08	3.54E-06	1.31E-06	8.45E-06	1.80E-06	2.50E-05	1.20E-05	1.00E+00
d_9	1.24E-06	9.03E-07	4.12E-05	2.43E-04	1.11E-04	1.10E-04	1.21E-03	9.98E-01
d_10	3.02E-06	2.49E-07	1.57E-05	1.39E-04	1.25E-05	9.94E-07	5.66E-05	1.00E+00
d_12	5.47E-06	6.20E-06	2.47E-05	1.25E-05	7.41E-05	1.53E-06	8.50E-04	9.99E-01
d_13	9.41E-06	6.82E-09	5.03E-05	3.70E-07	7.80E-05	9.66E-05	2.12E-04	1.00E+00
d_14	5.49E-06	1.66E-06	4.86E-06	2.08E-05	8.79E-05	2.50E-04	2.10E-05	1.00E+00
d_15	7.97E-06	8.06E-07	3.57E-07	5.57E-05	7.16E-05	2.46E-04	1.67E-04	9.99E-01
d_16	2.56E-08	2.40E-06	2.94E-05	3.37E-07	1.04E-04	7.23E-05	3.09E-04	9.99E-01
d_17	1.50E-07	2.62E-06	7.52E-06	6.63E-06	8.19E-05	1.50E-06	5.91E-04	9.99E-01
d_18	2.85E-05	4.14E-07	8.93E-05	2.04E-06	3.57E-04	1.80E-05	2.54E-04	9.99E-01
Bec	1.27E-06	1.05E-04	1.71E-06	9.33E-06	2.53E-05	1.78E-04	1.03E-05	1.00E+00
Máximo	2.85E-05	1.05E-04	8.93E-05	4.71E-04	4.17E-04	1.74E-03	4.20E-03	1.00E+00

Tabla 4.5. Valores singulares de las componentes de los despachos orientados al sur e incluidos en la campaña de monitorización y la sala de becarios.

Así, se puede concluir que **para la campaña de monitorización correspondiente a junio del 2011 los despachos orientados al sur y la sala de becarios muestran diferencias en su patrón de temperaturas no superiores al 0.5% entre sí. Sin embargo, se alejan cerca de un 8% y un 33% del comportamiento de la sala de descanso y del auditorio, respectivamente.**

El mismo análisis se repite ahora para la campaña de monitorización realizada en febrero. Las tablas 4.6 y 4.7 presentan los valores del espectro de valores singulares para las veinte estancias.

	C20	C19	C18	C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11
d_1	4.7E-07	8.4E-07	3.3E-07	8.4E-07	4.1E-06	1.7E-05	9.8E-06	6E-07	2.1E-05	4.4E-06
d_2	1.4E-06	1.1E-08	4.6E-07	7.2E-07	4.6E-07	6.5E-08	2E-07	7E-07	1.2E-08	4.7E-06
d_3	1.5E-08	1.8E-09	2.2E-07	3.2E-08	2E-07	6.9E-08	8.1E-08	2.2E-06	4E-08	7.4E-06
d_4	2.1E-10	2E-09	1.5E-08	2.6E-08	2.4E-08	3.7E-09	2.9E-12	8.5E-08	3.4E-06	5.7E-08
d_6	2.2E-08	8.5E-08	3.6E-07	5.9E-08	1.5E-06	6E-10	7.1E-07	2E-06	7.4E-07	1.3E-06
d_7	1.3E-09	1.3E-08	1.2E-08	6E-09	2E-07	3.6E-09	3.9E-08	2.7E-08	3.5E-06	2.1E-06
d_8	6.3E-09	4.1E-08	1.6E-09	3.7E-08	3.7E-08	6.1E-09	1.7E-08	6.8E-08	1.6E-05	7E-07
d_9	3.1E-08	5E-07	8.4E-07	3.9E-07	1.3E-06	2.3E-06	2.4E-06	1.4E-06	3.2E-06	7.6E-06
d_10	4.5E-09	3.8E-08	3E-07	1.3E-06	1.4E-07	3.5E-07	7.6E-08	3.5E-06	9.1E-08	1.8E-06
d_12	2.2E-08	5.7E-08	5.7E-08	2.2E-09	8.2E-08	2.5E-08	1.9E-06	5.1E-07	2.7E-06	1.6E-05
d_13	1.2E-10	2.8E-08	6.6E-08	1.2E-08	1.4E-08	1.1E-06	2.8E-08	1.2E-06	7.4E-09	1.4E-05
d_14	2.3E-08	8.9E-07	3.9E-08	5.1E-07	2.5E-07	1.3E-08	1E-05	4E-07	3.2E-07	5.5E-06
d_15	1.1E-07	1.7E-08	2.7E-07	3E-07	2.4E-06	1.5E-06	1.1E-06	8.4E-06	5.4E-14	3.3E-06
d_16	2.5E-10	1E-14	4E-08	2.6E-08	1.4E-07	1.7E-06	8.1E-08	7.5E-08	2.3E-07	2.4E-06
d_17	1.6E-07	5.8E-08	1.5E-07	8.3E-07	4.4E-08	1.1E-06	2.4E-08	4.5E-07	1.2E-07	1.1E-06
d_18	5.9E-07	2.2E-06	1E-08	7.6E-09	2.2E-06	2.2E-07	2.8E-06	4.9E-06	6.3E-06	6.9E-06
Bec	2.5E-08	4.2E-08	9.7E-09	4.8E-09	2.9E-07	1.4E-07	1.4E-09	5.2E-07	1.7E-07	6.4E-06
Des	1.8E-10	2.8E-09	3.1E-10	2E-08	1E-07	2.2E-08	1.4E-08	5E-07	1.2E-07	2E-05
Audit	3.3E-09	2.3E-08	7E-11	3.8E-10	3.6E-09	1.4E-09	1E-07	2.2E-07	7.6E-07	1.3E-05
Reun	5.5E-09	2.5E-10	3.4E-09	3.9E-09	9.1E-08	1.6E-08	1E-10	1.3E-08	8E-07	3.7E-06
Máximo	1.44E-06	2.21E-06	8.43E-07	1.35E-06	4.14E-06	1.73E-05	1.02E-05	8.36E-06	2.06E-05	1.96E-05

Tabla 4.6. Diez últimos valores singulares de todas las estancias en la serie de junio

	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
d_1	9.70E-06	3.57E-05	6.16E-06	4.21E-07	2.26E-04	6.19E-04	1.70E-04	1.33E-04	1.33E-01	8.66E-01
d_2	9.01E-07	3.85E-06	2.73E-06	6.07E-07	2.42E-05	1.18E-06	1.31E-04	1.35E-06	7.53E-02	9.25E-01
d_3	3.31E-08	2.74E-05	1.04E-05	6.91E-10	2.80E-05	6.46E-05	7.70E-05	3.14E-06	2.26E-02	9.77E-01
d_4	2.23E-07	1.62E-06	8.79E-05	1.35E-04	4.25E-04	2.33E-04	7.87E-05	1.40E-03	3.63E-02	9.61E-01
d_6	1.13E-07	2.02E-06	1.02E-07	8.58E-06	1.53E-05	1.88E-05	4.62E-06	3.78E-06	2.73E-02	9.73E-01
d_7	2.99E-06	3.90E-05	3.63E-05	8.31E-05	1.68E-06	3.85E-07	4.71E-06	7.63E-05	4.31E-02	9.57E-01
d_8	6.74E-06	2.81E-07	6.20E-09	7.34E-06	7.87E-06	2.37E-04	8.63E-07	1.08E-04	2.95E-02	9.70E-01
d_9	1.91E-05	1.75E-07	1.00E-06	1.54E-05	1.64E-04	1.08E-04	5.95E-05	2.91E-05	1.14E-01	8.85E-01
d_10	7.91E-08	7.48E-06	9.75E-08	9.62E-06	7.90E-06	8.13E-06	2.15E-05	3.35E-05	2.05E-02	9.79E-01
d_12	5.68E-05	4.29E-06	9.13E-05	4.91E-06	6.16E-06	1.32E-05	1.95E-04	3.40E-05	7.85E-02	9.21E-01
d_13	6.13E-05	1.52E-05	1.83E-04	2.44E-04	2.08E-04	1.40E-04	4.34E-04	5.88E-04	5.64E-02	9.42E-01
d_14	5.71E-06	1.40E-09	1.51E-05	2.96E-07	1.01E-05	2.12E-06	9.66E-05	5.04E-05	6.65E-02	9.33E-01
d_15	7.55E-07	7.51E-07	5.21E-06	4.74E-06	5.17E-05	1.95E-08	4.30E-06	8.23E-05	1.49E-02	9.85E-01
d_16	2.84E-07	2.64E-05	1.02E-06	2.69E-04	9.86E-05	9.00E-05	1.75E-06	1.12E-03	3.69E-02	9.62E-01
d_17	3.28E-08	7.54E-06	5.69E-06	1.90E-07	2.07E-09	8.22E-05	1.01E-04	1.94E-04	2.64E-02	9.73E-01
d_18	1.06E-05	3.74E-06	1.39E-05	1.70E-06	5.36E-04	2.13E-04	4.42E-07	2.22E-04	7.17E-02	9.27E-01
Bec	1.35E-05	3.87E-06	9.51E-05	2.56E-05	1.06E-04	9.08E-07	3.16E-07	4.06E-04	7.23E-02	9.27E-01
Des	2.17E-05	1.82E-06	1.92E-05	1.15E-06	3.55E-05	4.42E-05	2.78E-04	6.26E-05	4.51E-02	9.54E-01
Audit	7.61E-06	2.61E-06	1.20E-04	3.41E-06	6.69E-07	3.19E-05	2.10E-02	1.92E-04	1.20E-03	9.77E-01
Reun	1.31E-06	5.10E-07	6.43E-06	6.74E-06	2.00E-05	3.87E-04	5.55E-05	7.26E-03	3.58E-02	9.56E-01
Máximo	6.13E-05	3.90E-05	1.83E-04	2.69E-04	5.36E-04	6.19E-04	2.10E-02	7.26E-03	1.33E-01	9.85E-01

Tabla 4.7. Diez últimos valores singulares de todas las estancias en la serie de junio

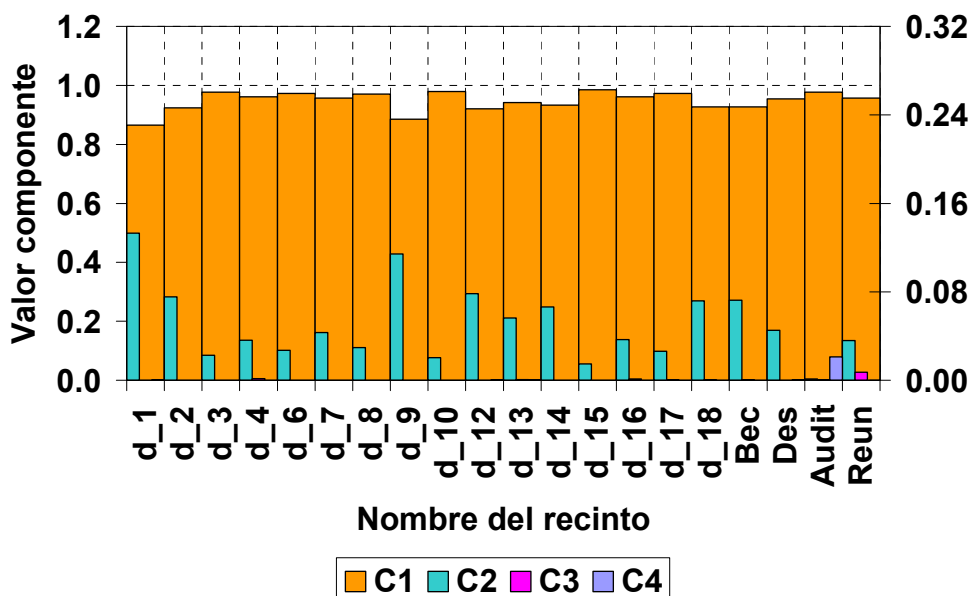


Figura 4.18. Valores singulares de las cuatro primeras componentes para todas las estancias del C-Ddl con la serie de febrero. La primera de ellas se representa en el eje de la izquierda y las restantes en el eje de la derecha.

En este caso también se observa una fuerte componente principal dominante, aunque de menor intensidad que en el caso de la serie de junio. En cualquier caso, también se observa que más allá de la segunda componente principal no hay contribuciones relevantes. En la figura 4.18 se representan gráficamente los valores de las cuatro primeras componentes para todos los recintos monitorizados en esta campaña. Se puede observar que la primera de las componentes (C1, eje de la derecha) es la claramente dominante en el patrón de temperaturas de todas las estancias. Las tres siguientes (C1, C2 y C3, eje de la derecha) toman valores netamente inferiores a la primera. En este caso la componente principal oscila entre el 83% y el 95% de la totalidad, según la estancia. A diferencia del caso anterior, los datos no sugieren que existan dos grupos de estancias claramente diferenciados. No obstante, se repite el mismo análisis que en la serie anterior diferenciando los despachos orientados al sur y el despacho de becarios.

En la tabla 4.8 se muestran los nuevos resultados para el espectro de valores singulares de las estancias seleccionadas. En la figura 4.19 se representan gráficamente los valores de los dos valores singulares asociados a las dos primeras componentes para todos despachos incluidos en el nuevo análisis.

A diferencia de lo sucedido en la serie anterior, las diferencias provienen de la temperatura de consigna escogida, así como con los días de ocupación. Por otra parte, el sistema de climatización para refrigeración es mediante aire, mientras que la calefacción es a través de suelo radiante, que puede sufrir más heterogeneidades.

	C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9
d_1	8,50E-07	9,51E-07	3,06E-08	7,79E-07	2,15E-05	1,63E-05	1,93E-05	3,61E-07	1,27E-05
d_2	1,62E-06	4,17E-07	7,85E-07	6,67E-07	4,55E-07	2,16E-06	4,63E-07	3,29E-09	1,20E-07
d_3	2,96E-08	4,70E-08	2,41E-07	4,39E-08	8,15E-08	5,70E-09	1,46E-07	3,63E-06	4,78E-10
d_4	2,10E-09	1,85E-11	1,19E-08	2,30E-08	5,02E-12	1,18E-09	8,70E-09	2,26E-07	3,35E-06
d_6	1,46E-07	3,01E-07	4,64E-08	1,11E-07	1,64E-08	2,01E-06	8,03E-07	5,21E-06	3,75E-08
d_7	1,20E-09	2,65E-08	4,93E-10	1,89E-08	1,50E-08	1,55E-07	5,05E-08	7,62E-08	5,29E-06
d_8	5,94E-09	3,42E-08	3,09E-08	4,79E-08	2,17E-08	2,30E-07	2,28E-09	9,72E-07	2,04E-05
d_9	2,72E-08	2,07E-08	2,26E-06	1,71E-07	2,24E-06	4,02E-06	2,40E-06	2,25E-06	1,16E-05
d_10	3,96E-08	8,68E-09	2,85E-07	2,02E-06	2,54E-07	7,23E-07	3,02E-10	4,19E-06	6,68E-08
d_12	9,76E-09	2,29E-07	8,11E-10	1,40E-10	3,98E-08	1,20E-08	2,32E-06	9,92E-07	1,23E-05
d_13	8,38E-09	9,95E-08	8,39E-09	6,52E-10	1,25E-06	2,53E-08	1,02E-08	2,86E-06	1,69E-06
d_14	1,37E-07	1,22E-06	3,68E-07	3,97E-07	4,31E-08	1,95E-06	1,17E-05	4,06E-07	3,31E-08
d_15	1,02E-07	9,84E-08	3,94E-07	4,01E-07	4,19E-06	3,26E-06	1,96E-06	5,16E-06	3,56E-07
d_16	8,03E-09	4,73E-09	3,04E-08	5,71E-10	2,12E-06	5,46E-08	2,93E-08	4,05E-07	5,43E-08
d_17	2,80E-07	8,86E-08	3,68E-08	1,31E-06	7,19E-07	2,94E-07	2,47E-09	5,63E-07	2,36E-07
d_18	6,68E-07	3,00E-06	8,01E-07	8,36E-09	2,32E-08	1,12E-06	5,29E-06	1,59E-05	1,10E-05
Bec	2,42E-08	3,75E-08	7,02E-08	1,56E-09	1,48E-07	7,67E-08	2,55E-10	2,79E-07	6,49E-07
Máximo	1,62E-06	3,00E-06	2,26E-06	2,02E-06	2,15E-05	1,63E-05	1,93E-05	1,59E-05	2,04E-05

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
d_1	5,26E-05	2,85E-05	1,84E-06	1,19E-07	4,05E-04	1,09E-03	1,76E-01	8,22E-01
d_2	4,96E-07	1,43E-05	5,10E-06	8,81E-07	7,63E-06	4,20E-05	1,05E-01	8,95E-01
d_3	3,49E-06	5,52E-05	4,03E-06	3,04E-07	6,44E-05	4,04E-05	1,17E-02	9,88E-01
d_4	1,90E-06	2,34E-06	6,95E-05	1,81E-04	4,05E-04	1,43E-03	2,34E-02	9,75E-01
d_6	2,69E-06	1,26E-08	1,49E-07	8,54E-06	2,50E-05	4,96E-06	1,50E-02	9,85E-01
d_7	4,40E-05	3,24E-06	8,54E-05	5,87E-05	4,75E-06	3,12E-05	2,75E-02	9,72E-01
d_8	6,00E-06	1,32E-05	7,32E-06	2,71E-07	4,43E-05	3,47E-04	1,70E-02	9,83E-01
d_9	1,77E-05	9,20E-06	5,65E-06	1,34E-05	2,41E-04	7,59E-05	1,54E-01	8,45E-01
d_10	6,65E-06	1,96E-06	5,56E-08	1,70E-05	2,90E-06	3,08E-05	1,01E-02	9,90E-01
d_12	7,72E-05	6,55E-06	1,02E-04	4,24E-05	8,51E-06	5,65E-09	1,09E-01	8,90E-01
d_13	2,86E-05	1,65E-04	2,01E-05	3,08E-04	5,82E-04	2,57E-04	8,31E-02	9,15E-01
d_14	9,21E-06	5,65E-06	1,56E-05	6,44E-06	3,01E-07	1,35E-07	9,42E-02	9,06E-01
d_15	6,22E-07	6,01E-06	1,39E-05	8,75E-07	5,49E-05	3,26E-05	6,27E-03	9,94E-01
d_16	1,16E-05	1,68E-05	4,84E-05	2,19E-04	1,18E-04	9,30E-04	2,04E-02	9,78E-01
d_17	5,61E-06	3,07E-06	1,91E-05	3,18E-06	1,17E-05	2,27E-04	1,36E-02	9,86E-01
d_18	3,01E-06	7,30E-06	2,39E-05	2,64E-06	6,70E-04	6,26E-04	9,98E-02	8,99E-01
Bec	6,52E-08	8,33E-07	1,99E-04	1,37E-04	5,39E-05	8,35E-05	1,01E-01	8,98E-01
Máximo	7,72E-05	1,65E-04	1,99E-04	3,08E-04	6,70E-04	1,43E-03	1,76E-01	9,94E-01

Tabla 4.8. Valores singulares de las componentes de los despachos orientados al sur incluidos en la campaña de monitorización y la sala de becarios.

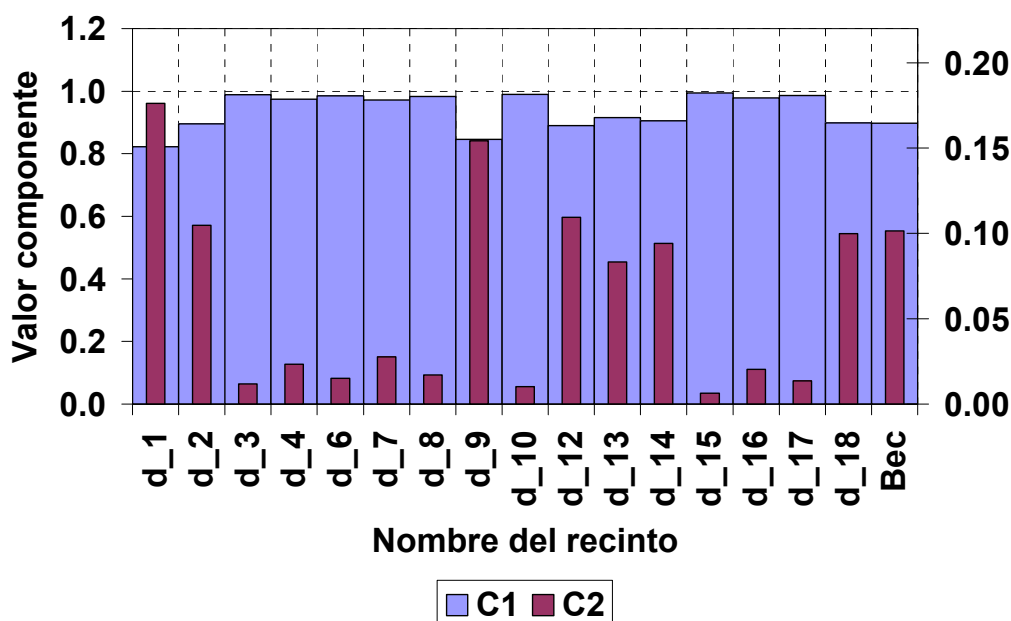


Figura 4.19. Valores singulares de las dos primeras componentes para los despachos orientados al sur y la sala de becarios del C-Ddl para la serie de febrero. La primera de ellas se representa en el eje de la izquierda y la segunda en el eje de la derecha.

Así, para la serie de datos de febrero, correspondiente a un periodo de calefacción, los despachos seleccionados no muestran discrepancias superiores al 20% en su patrón de temperaturas con respecto al resto de las estancias de los C-Ddl.

4.4. VALIDACIÓN DE LA APROXIMACIÓN DE TEMPERATURA A UN NODO

Una de las hipótesis fundamentales del modelo de simulación empleado es que la temperatura en el interior del recinto se puede representar fielmente por un único valor. Hay que recordar en estos momentos que la temperatura del aire interior es una función de la posición que se escoja.

Aunque otros estudios (Bayona, 2012) ya han abordado la estratificación de la temperatura del aire interior en diferentes estancias de este tipo sin encontrar diferencias significativas, en este trabajo de investigación se opta por la comprobación experimental de los resultados anteriores.

Para estudiar los efectos de la posible estratificación del aire se han colocado sensores adicionales de temperatura distribuidos por una de las estancias, concretamente en el despacho 1. Al igual que en el caso del análisis de las componentes principales presentado en la anterior sección, se ha empleado medidores autónomos marca ONSET modelo HOB0 U10-001 para medida de temperatura, durante periodos de calefacción y de refrigeración de parte del 2010. Concretamente, se han colocado en tres alturas distintas en el centro de la estancia y a la misma altura al norte y al sur, como se muestra en la figura 4.20.

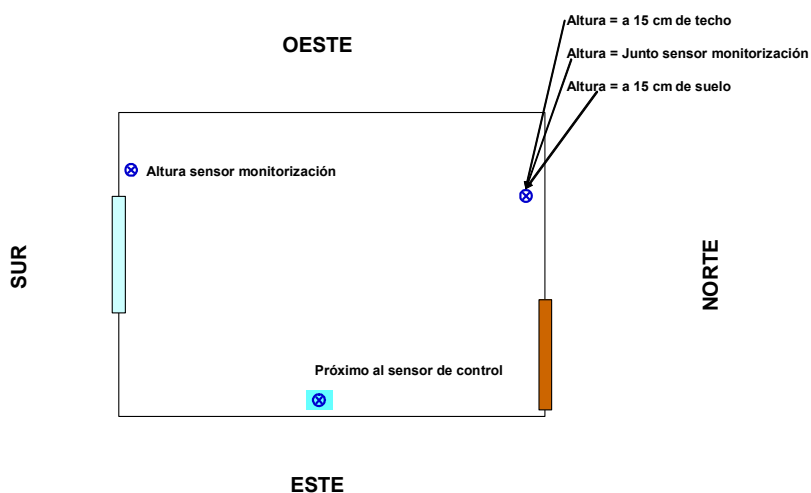


Figura 4.20. Esquema de la instalación de sensores portátiles para la medida de la estratificación del aire en el despacho 01

La campaña experimental realizada se extiende desde enero hasta junio de 2010. En la figura 4.21 se presenta la diferencia de temperaturas entre la medida efectuada cerca de la

pared norte y la medida efectuada cerca de la pared sur. Las diferencias oscilan en torno a 0.5°C a lo largo de la serie, por lo que se puede concluir que **no existen diferencias relevantes en la temperatura medida en la pared norte y la sur a 1.5 m de altura.**

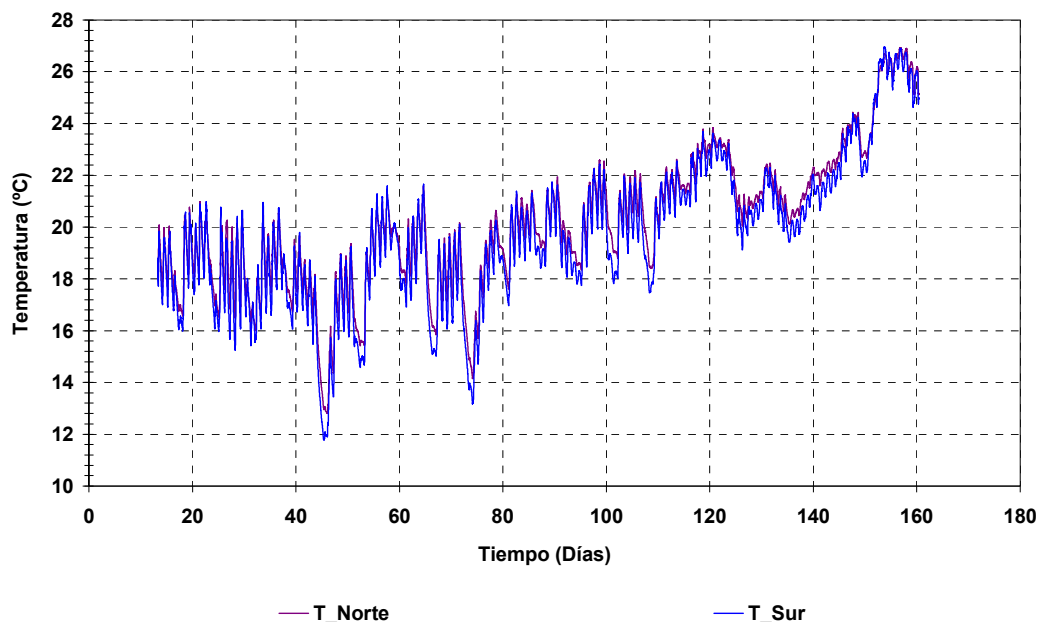


Figura 4.21. Temperaturas cerca de la pared norte y de la pared sur, respectivamente. Medidores portátiles instalados en el despacho 1 desde enero hasta junio de 2010.

Con respecto a las medidas en altura, la información gráfica se presenta en la figura 4.22. Para toda la serie presentada, no se observan diferencias superiores a 0.5 °C entre el sensor instalado cerca del techo y el instalado a 1'5 m. De ese modo, **no existe estratificación del aire con valores significativos entre 1.5 m y alturas superiores.** El sensor instalado cerca del suelo sí presenta diferencias más acusadas con respecto al instalado a 1.5 m, diferencias correladas con la calefacción o la refrigeración. Durante el periodo de calefacción, el sensor más próximo al suelo presenta valores que superan 1.5 °C a el que esta a media altura, mientras que durante el periodo de refrigeración el mismo sensor mide valores ligeramente inferiores a 1 °C con respecto al de altura media. Estas diferencias se presentan durante el funcionamiento de los sistemas de climatización. En ausencia de éstos no existe diferencia apreciable entre las medidas de ambos sensores.

En el caso de la calefacción la diferencia se puede explicar basándose en dos factores: en primer lugar el funcionamiento del suelo radiante y en segundo lugar la incidencia de la radiación solar directa en algunos momentos de la medida. Este sensor no se encuentra protegido contra la radiación, con lo que la proximidad a una superficie de temperatura más elevada perturba la medida del sensor, al igual que lo hace la radiación solar directa en las ocasiones en que incide sobre él. Por ello, la medida de la estratificación del aire en el caso de la calefacción debe ser inferior a la descrita. En el caso de la refrigeración, aunque las

diferencias son más acusadas que en el caso de la diferencia norte-sur, las diferencias que existen entre dichos sensores no invalidan la aproximación de la temperatura a un nodo.

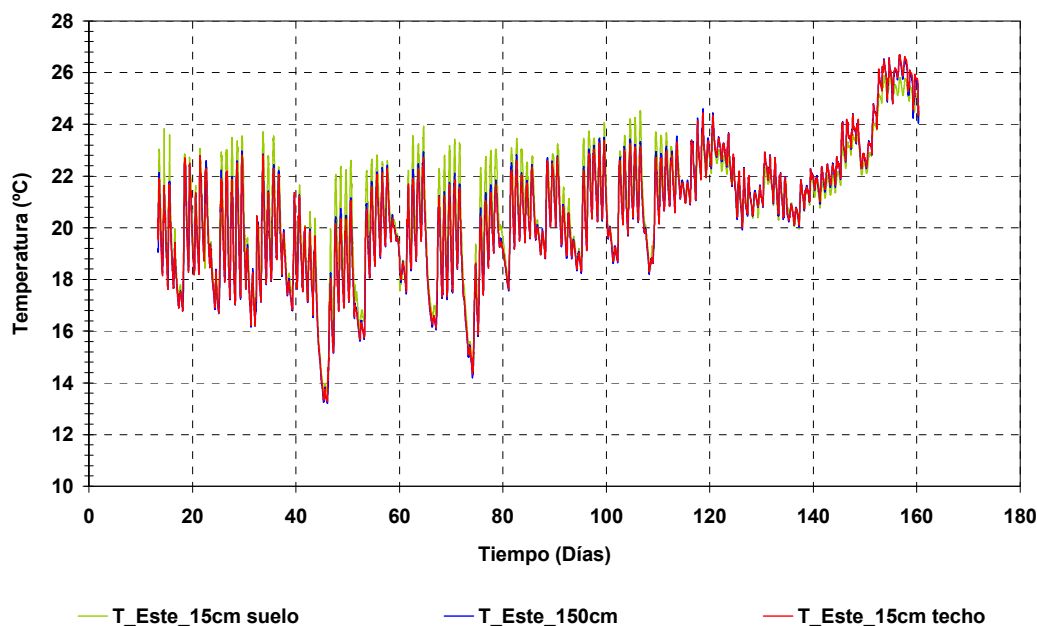


Figura 4.22. Temperaturas a diferentes alturas en la pared este. Medidores portátiles instalados en el despacho 1 desde enero hasta junio de 2010.

Así, la estratificación vertical medida desde enero hasta junio en el despacho 1 con medidores de temperatura portátiles, teniendo en cuenta los diferentes fenómenos de intercambio de calor entre las superficies y los sensores no invalidan la aproximación de temperatura a un nodo, que consiste en suponer que todo el aire de la estancia se encuentra a la misma temperatura.

4.5. VALIDEZ DEL MODELO EMPLEADO EN LA EVALUACIÓN TEÓRICA

La comprobación de la validez de un modelo se basa en las comparaciones entre las predicciones del modelo teórico y las medidas experimentales. La manera más simple de realizar dicha comparación consiste en la representación gráfica de ambas series temporales y la inspección visual de las diferencias existentes. Una de las principales ventajas de esta técnica es la rapidez con la que se puede diagnosticar fallos en las predicciones del modelo o en las medidas experimentales, descartando la validez de la aproximación. Sin embargo, semejante análisis cualitativo difícilmente puede establecer un criterio de validación positivo.

Para establecer un criterio de validación positivo se requiere de un método de análisis capaz de cuantificar las diferentes fuentes de incertidumbre presentes en el estudio. Las fuentes de incertidumbre presentes en la comparación teórico-experimental son cuatro: incertidumbre de la medida experimental, incertidumbre de los parámetros del modelo, incertidumbre estructural del modelo e incertidumbre propagada a la respuesta del modelo.

La incertidumbre asociada a las medidas experimentales de este estudio ha sido estimada en el capítulo anterior y se representa matemáticamente mediante una serie de cotas inferiores y superiores asociadas a cada valor experimental proporcionado, $[y_{min}^*(t), y_{max}^*(t)]$. La incertidumbre en los parámetros de entrada del modelo generalmente es de una naturaleza aleatoria y su origen puede ser variado, entre los que se pueden destacar:

- un conocimiento imperfecto de la geometría o composición del objeto de estudio,
- la falta de mediciones sobre algunos de los parámetros o la incertidumbre asociada a los instrumentos con los que se realizaron las medidas de las propiedades del sistema,
- incertidumbre asociada al uso detallado del sistema, por ejemplo, relativa a las ganancias internas de calor debidas a la ocupación,
- conocimiento imperfecto sobre alguno de los fenómenos físicos involucrados en el comportamiento dinámico del sistema.

Como en el caso de los datos experimentales, las incertidumbres asociadas a los parámetros del modelo se representan matemáticamente mediante cotas inferiores y superiores de los mismos. Si denominados por $\theta = \{\theta_i(t) / i = 1, \dots, p\}$ el vector p-dimensional de parámetros, sus incertidumbres asociadas se expresarán mediante el siguiente producto cartesiano de intervalos del espacio de parámetros:

$$\Theta \equiv \prod_{i=1}^p [\theta_{i,min}(t), \theta_{i,max}(t)], \text{ (ec. 4.9)}$$

Donde a Θ se le denomina el conjunto de parámetros. Como en el caso del análisis de sensibilidad presentado en el capítulo anterior, se ha tomado una variación del espacio de parámetros del 10% frente al valor nominal del modelo. Es conveniente señalar en este punto que la elección del porcentaje de variación de cada parámetro para configurar el conjunto de parámetros depende del objetivo final con el que se calcule la incertidumbre. Así, es habitual tomar intervalos de variación de los parámetros más pequeños para procesos de validación que para procesos de diagnóstico (Palomo, 2002).

Las incertidumbres asociadas a la estructura del modelo se incorporan en muchos estudios mediante la introducción de un término estocástico en las ecuaciones diferenciales que determinan la evolución del sistema (Nielsen, 2000). En esa aproximación se sustituye un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales por un sistema de ecuaciones diferenciales estocásticas no lineales. La técnica está ganando popularidad en el ámbito de la evaluación energética experimental tanto de componentes de la edificación (Jiménez, 2008; Friling, 2009; Lodi, 2010) como de edificaciones propiamente dichas (Andersen, 2000; Madsen, 1995) y ya ha sido empleada en otros campos como en la predicción de variables meteorológicas para la generación de energía eléctrica de origen eólico (Gallego, 2011) o la predicción del consumo energético en redes de distrito (Nielsen, 2006). De hecho, existe software especialmente dedicado para la resolución de ecuaciones diferenciales estocásticas

que se pueden expresar de forma analítica (CTSM, 2005). El modelo de simulación implementado mediante el software de TRNSYS es susceptible de encuadrarse dentro de esta aproximación de dos maneras diferentes: mediante la formulación explícita de las ecuaciones diferenciales ordinarias que lo definen para su posterior introducción en el software especializado o mediante la incorporación de las técnicas propias de la estimación de los parámetros de una ecuación diferencial estocástica en el método de cálculo y/o ajuste del modelo. Cualquiera de estas dos aproximaciones excede con creces los objetivos de este trabajo y la incertidumbre asociada al modelo se supondrá igual a cero.

Finalmente, la incertidumbre propagada a la respuesta del modelo es la medida del efecto que se produce sobre la respuesta del sistema debido a la incertidumbre de sus parámetros. Como en los casos anteriores, la incertidumbre en la respuesta del modelo en el instante t , asociada al conjunto de parámetros Θ , se puede expresar matemáticamente como un intervalo de variación de la variable de salida, y :

$$[y_{\min}(t), y_{\max}(t)], \text{ (ec. 4.10)}$$

De tal forma que para todo instante de tiempo y cualquier vector de parámetros, θ , perteneciente al conjunto de parámetros Θ la probabilidad de que la respuesta del modelo a este vector de parámetros no pertenezca a dicho intervalo sea menor que un valor α mayor que cero y determinado de antemano. A dichos intervalos se les conoce como las “bandas de incertidumbre de la simulación al $\beta\%$ de intervalo de confianza”, donde $\beta = 100 \cdot (1 - \alpha)$. Valores típicos para el intervalo de confianza son el 90, 95, 98 y 99%. Nótese que la amplitud de la banda de incertidumbre de la simulación es una función monótona creciente de β . Si las bandas de incertidumbre de la simulación al 99% de intervalo de confianza tienen una amplitud superior a la amplitud de la incertidumbre experimental se dice que el modelo no es lo suficientemente preciso como para ser validado con el dispositivo experimental del que se dispone.

Mediante la comparación de las bandas de incertidumbre de la simulación al $\beta\%$ con las medidas experimentales y su serie de incertidumbres se pueden obtener algunas conclusiones sobre la validez del modelo. De hecho, se considera un modelo válido al $\beta\%$ de intervalo de confianza si las bandas de incertidumbre de la simulación al $\beta\%$ de intervalo de confianza se encuentran siempre incluidas en las bandas de incertidumbre experimental. Es importante notar en este caso que para incertidumbres experimentales demasiado elevadas la imprecisión del modelo validado puede ser muy superior. Si la condición anterior no se satisface pero no más del $(1 - \beta)\%$ de las medidas experimentales se encuentran fuera de las bandas de incertidumbre de la simulación al $\beta\%$ la validez del modelo requiere de técnicas matemáticas más sofisticadas como la estimación de los parámetros libres del sistema. Este caso se abordará más adelante en el trabajo.

Existen numerosas opciones para el cálculo de las bandas de incertidumbre de la simulación al $\beta\%$ de intervalo de confianza. La aproximación más fácil consiste en emplear los resultados de

un análisis de sensibilidad diferencial previo (ver capítulo anterior) y aplicarlas directamente como dichas bandas. La simplicidad de esta aproximación es tanto su principal ventaja como su más fuerte inconveniente. La hipótesis subyacente a un análisis de sensibilidad diferencial es la linealidad entre la variación en los parámetros y la variación en la respuesta del modelo a dicha variación. En ese esquema se supone, además, que la sensibilidad a cada parámetro es independiente de los valores de otros parámetros. Para la mayoría de los sistemas bajo estudio estas hipótesis no son ciertas, pues como se demostró en el capítulo anterior existen correlaciones entre los efectos de los diferentes parámetros. Por otra parte, modelos detallados y precisos del comportamiento térmico deben ser necesariamente no lineales, dado que incluyen fenómenos físicos no lineales en su formulación. En cualquier caso, para variaciones pequeñas de los parámetros ambas hipótesis pueden resultar razonables (Lomas y Eppel, 1992).

Otra posibilidad extendida para el cálculo de las bandas de incertidumbre de la simulación al $\beta\%$ de intervalo de confianza es el empleo de técnicas de MonteCarlo. Para la aplicación de esta técnica los parámetros del modelo se suponen variables aleatorias de función de distribución conocida. Acto seguido se escogen al azar y de acuerdo con las distribuciones de probabilidad asociadas a cada parámetro N vectores de parámetros, θ^s , $s = \{1, \dots, N\}$, para los que se calculan los valores de la respuesta del modelo, $y(t, \theta^s)$, $s = \{1, \dots, N\}$. Dado que hay un gran número de parámetros en el modelo según el teorema central del límite se espera que, independientemente de sus distribuciones de probabilidad de cada uno, las respuestas del modelo se encuentren distribuidas normalmente. De hecho, una distribución normal con media:

$$m(t) = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N y(t, \theta^s), \text{ (ec. 4.11)}$$

Y desviación estándar:

$$s^2(t) = \frac{1}{N-1} \sum_{s=1}^N [y(t, \theta^s) - m(t)]^2. \text{ (ec. 4.12)}$$

Las bandas de incertidumbre de la simulación al $\beta\%$ de intervalo de confianza se estiman, entonces, mediante la relación:

$$m(t) \pm Z_{\alpha/2} s(t), \text{ (ec. 4.13)}$$

Donde $Z_{\alpha/2}$ es el valor crítico que deja fuera un área α en las colas de la curva normal. Su valor se puede obtener de las tablas de la distribución normal y para los intervalos más comunes sus valores son: 1.645 (90%), 1.96 (95%), 2.33 (98%), 2.575 (99%). Esta relación se debe

interpretar como que la probabilidad de observar simulaciones fuera de dichas bandas en el instante t es inferior al 1%.

Si las respuestas del modelo se distribuyen según la distribución normal, la estimación de su varianza sigue la distribución χ^2 de $N-1$ grados de libertad. De ahí se deduce que el intervalo de confianza $(1-\alpha)\%$ para la desviación estándar cumple:

$$s(t) \sqrt{\frac{N-1}{\chi^2_{\alpha/2, N-1}}} \leq \sigma(t) \leq s(t) \sqrt{\frac{N-1}{\chi^2_{1-\alpha/2, N-1}}} \quad .(ec. 4.14)$$

De la relación anterior se deduce que la precisión en la estimación de la varianza depende solamente del número N de simulaciones realizadas y no del número de parámetros libres existentes en el modelo. De hecho, sólo se obtienen precisiones marginales en precisión por encima de 100 simulaciones. Este hecho convierte al método de MonteCarlo en un modo muy eficiente de calcular las bandas de incertidumbre de la simulación al $\beta\%$ de intervalo de confianza cuando un número particularmente elevado de parámetros están involucrados en el análisis.

En este estudio se ha procedido a calcular las bandas de incertidumbre de la simulación al 99% de intervalo de confianza para una variación del 10% en los parámetros de entrada. Esta variación de los parámetros es referida a los valores nominales y durante el periodo de verano de 2009 en el que el edificio se encuentra en evolución libre.

Aunque hay software específico para la realización de baterías de simulaciones en el entorno de TRNSYS (Genopt, Berkeley) éste no es lo suficientemente flexible como para aplicar el método de Montecarlo con suficiente comodidad. Para ello, se ha desarrollado un programa en Matlab que puede emplear a TRNSYS como si fuese una más de sus subrutinas.

Se ha comprobado en las series de datos experimentales para el despacho 13 que durante el periodo de evolución libre del año 2009 la puerta y la ventana se encontraron completamente cerradas, los sistemas de climatización sin funcionamiento y que el consumo eléctrico en el interior del despacho se mantuvo en el nivel mínimo.

En la figura 4.23 se presenta el resultado para la calibración de la simulación. Se presenta la evolución temporal de la temperatura del aire interior durante la evolución libre de 2009. En naranja se observa la medida experimental, que muestra un claro ascenso en media, dado que no funcionan los sistemas de refrigeración y el sistema se mueve de forma dinámica entre dos estados de equilibrio en su inercia. **La simulación**, por otra parte y verde en la misma figura, **se realiza con los valores nominales del modelo original y se estima una incertidumbre media del modelo teórico de 0.1 °C según el método de Montecarlo**. Así, **como la incertidumbre del modelo es inferior a la experimental, el diseño experimental permite juzgar su calibración**.

No obstante, se puede comprobar a simple vista que, aunque la tendencia en la evolución temporal de la temperatura del aire interior es capturada por el modelo, la diferencia es demasiado grande, e incluso superior a la incertidumbre experimental. En la figura 3.24 se

muestran los residuos para la misma serie donde se comprueba que la diferencia se mantiene fuera de la banda de incertidumbre experimental.

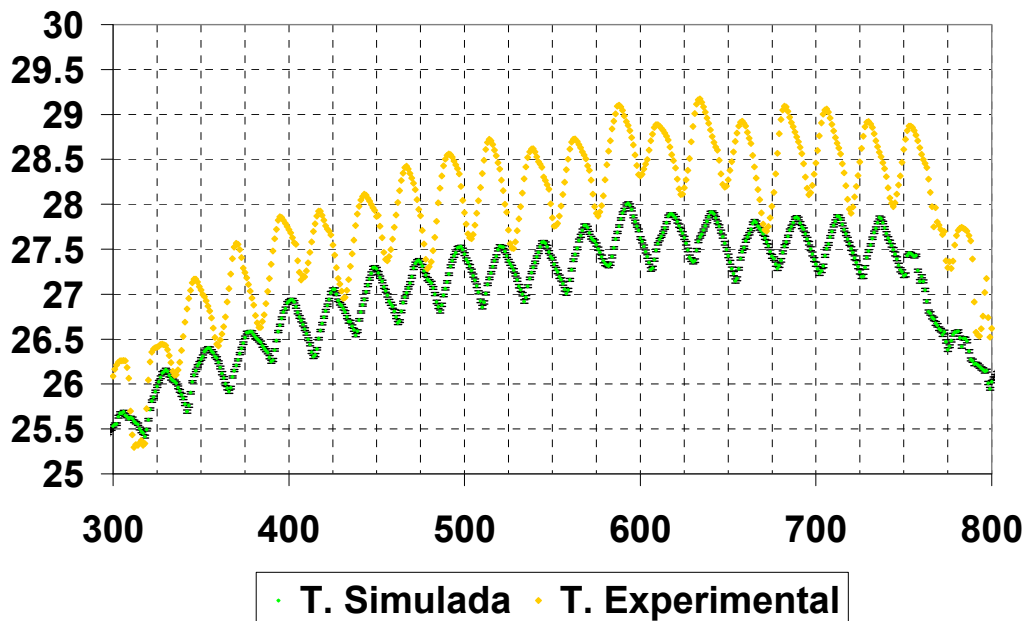


Figura 4.23. Temperatura del aire interior simulada según los parámetros originales del modelo y experimental en el despacho 13 durante la evolución libre de 2009.

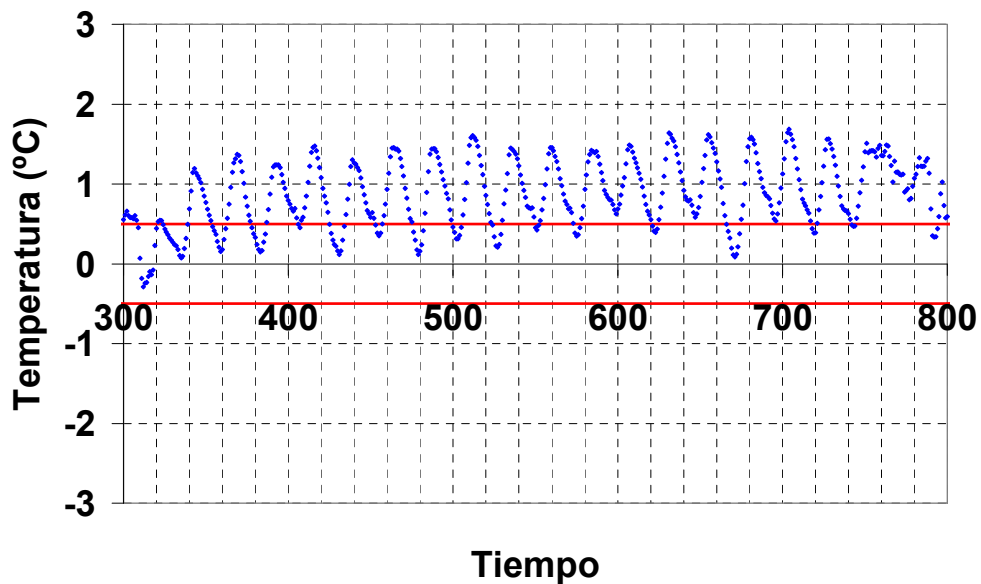


Figura 4.23. Residuo de la temperatura del aire interior según los parámetros originales del modelo en el despacho 13 durante la evolución libre de 2009.

De este modo, se puede concluir que **el modelo original no es calibrado, puesto que la estimación teórica junto a su incertidumbre caen fuera de la incertidumbre experimental asociada a la medida.**

No obstante, es posible que una realización distinta de los parámetros del modelo pudiera ajustarse a los datos experimentales. A este método se le denomina estimación de parámetros libres y forma parte del ajuste del modelo que se presenta en el siguiente capítulo.

4.6. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En los siguientes puntos a continuación se resumen los resultados más relevantes de este capítulo:

- La campaña de monitorización en el C-Ddl SP4 comenzó tras instalarse los sensores en 2008, continúa en la actualidad y se prevé que una vez finalizado el proyecto se puedan tomar más datos experimentales para futuros estudios. De los datos generados hasta el 19 de mayo de 2011, y tras un primer control de calidad, se dispone de un 83% de datos potencialmente útiles, equivalente a 830 días completos de datos experimentales para los diferentes estudios.
- **Para el periodo de monitorización considerado se dispone de dos series temporales sin interrupciones del servicio y lo suficientemente largas para el propósito del estudio,** correspondientes a los valores horarios de los periodos comprendidos entre el 1 de agosto de 2009 y el 31 de diciembre de 2009 y el 26 de enero de 2010 y el 30 de abril de 2010. **Dichas series temporales incluyen, además, todas las fenomenologías presentes en una edificación: evolución libre, calefacción y refrigeración.**
- Pese a que se trata de una técnica de conocidas limitaciones, se realizan **termografías de la fachada sur** a mediodía solar del 24 de febrero de 2012, que **no revelan grandes diferencias cualitativas en lo que a las propiedades térmicas de la fachada se refiere.**
- Se ha empleado un criterio de selección que maximiza la fiabilidad en la serie de datos experimentales, se ha evaluado el confort térmico de las tres estancias seleccionadas tanto desde el punto de vista del calentamiento efectivo como mediante el cálculo detallado del Índice de valoración medio y se ha indicado el modo de trasladarlo al porcentaje de insatisfechos desde el punto de vista térmico. Se ha calculado un día tipo y se ha analizado la evolución de las temperaturas. También se ha empleado una variable de selección como la concentración interior de CO₂ como variable discriminadora en el análisis de confort. Se puede concluir, entonces, que **las estancias seleccionadas cumplen los criterios de confort exigidos a una edificación y son, en ese aspecto, representativos del régimen de operación para el que ha sido diseñado el C-Ddl.**

- Se han realizado campañas de monitorización con dispositivos portátiles que incluyen el resto de las estancias del C-Ddl, en febrero y en junio de 2011. **Se ha aplicado un Análisis de Componentes Principales** a las series temporales de las temperaturas obtenidas para obtener un criterio cuantitativo de la representatividad en el uso de las diferentes estancias del C-Ddl. Dicho análisis ha concluido que **para la campaña de monitorización correspondiente a junio del 2011 los despachos orientados al sur y la sala de becarios muestran diferencias en su patrón de temperaturas no superiores al 0.5%, mientras que se alejan cerca de un 8% y un 33% del comportamiento de la sala de descanso y del auditorio, respectivamente.** Asimismo, **para la serie de datos de febrero, correspondiente a un periodo de calefacción, los despachos seleccionados no muestran discrepancias superiores al 20% en la dinámica térmica con respecto al resto de las estancias de los C-Ddl.**
- Se han instalado sensores portátiles de temperatura en el despacho 1 en diferentes alturas y diferentes orientaciones y se ha realizado una campaña de monitorización desde enero hasta junio de 2010. No se han encontrado diferencias significativas entre las medidas en diferentes orientaciones. Tampoco se han encontrado diferencias entre el sensor cercano al techo y el puesto a una altura media. Una parte de las diferencias existentes entre el sensor cercano al suelo y el de altura media pueden ser explicadas teniendo en cuenta los fenómenos de intercambio de calor entre el sensor y la superficie cercana. **Se puede concluir que las medidas realizadas de estratificación en el despacho 1 no invalidan la aproximación de temperatura a un nodo.**
- Se ha implementado un **método para estimar la incertidumbre asociada al modelo teórico mediante simulaciones basadas en el método de Montecarlo.**
- Asimismo, **se ha desarrollado un programa en Matlab que es capaz de realizar esa tarea de forma sencilla, considerando al entorno TRNSYS como una función oráculo externa.**
- Para el periodo de **evolución libre de 2009 se ha estimado una incertidumbre del modelo de 0.1 °C, inferior a la experimental y, por tanto, corroborando que la relación entre modelo a identificar y dispositivo experimental es adecuada.**
- Se ha comprobado que durante el periodo de evolución libre de 2009 **el modelo no calibra a los datos experimentales con los valores nominales.**
- Se identifica la estimación de parámetros libres como una posible solución al problema, lo que implica ulteriores desarrollos.

CAPÍTULO 5: DIAGNÓSTICO DEL MODELO ORIGINAL. MODIFICACIÓN Y AJUSTE DE UN NUEVO MODELO

5. DIAGNÓSTICO DEL MODELO ORIGINAL. MODIFICACIÓN Y AJUSTE DE UN NUEVO MODELO

Tal y como se ha demostrado en el capítulo anterior, el modelo original no es posible calibrarlo con los valores experimentales. Sin embargo, es posible que con una elección distinta de los parámetros del modelo se puedan ajustar las estimaciones teóricas con los datos experimentales.

Las primeras fuentes de incertidumbre sobre el modelo en evolución libre son las derivadas de los cálculos realizados a través de las excitaciones externas del sistema: sus variables exógenas, entre ellas pueden considerarse la reflectancia hemisférica del terreno, el índice de cobertura nubosa o el estado del terreno bajo el C-Ddl que pueden influir notablemente sobre su comportamiento. Por lo que, en primer lugar se realizan ajustes sobre estas variables.

Con estas variables caracterizadas apropiadamente se procede al ajuste del modelo, para lo que se requiere de las herramientas numéricas adecuadas. El ajuste de un modelo se formula como un problema matemático de optimización no lineal multiobjetivo, esto es, la minimización de una función vectorial y no lineal. Para ello, se adecúa el modelo a las herramientas informáticas adecuadas en el entorno de cálculo.

Se demuestra que el modelo original no puede ser ajustado a los datos, por lo que se desarrolla un método de diagnóstico y modificación del modelo original atendiendo a criterios físicos y matemáticos. Una vez que se dispone de un modelo lo suficientemente adecuado para representar la dinámica de la evolución libre del sistema éste deberá ser modificado nuevamente para contemplar las funciones de excitación interna del sistema: sus variables endógenas. La caracterización de las variables endógenas requiere de la modelización de los sistemas de climatización así como del resto de las ganancias internas.

Una vez caracterizadas estas variables se puede proceder al ajuste de un modelo de alto orden en condiciones reales de uso, para lo que hay que formular una hipótesis de consistencia física: los parámetros identificados durante la evolución libre se mantienen durante las condiciones reales de uso.

En este punto, además, se debe destacar la importancia de la incertidumbre experimental. Un modelo de elevado orden se puede considerar ajustado si sus predicciones no se alejan de las medidas experimentales más allá de la incertidumbre experimental de éstas. No obstante, aunque un modelo no se pueda considerar ajustado según la definición anterior es posible que la desviación se encuentre acotada. Aunque desde un punto de vista físico este tipo de modelos no se puedan considerar correctos, bajo determinadas condiciones se pueden emplear con otros objetivos como, por ejemplo, el predictivo dentro de un intervalo de error fijado.

A lo largo de este capítulo, y con el objetivo de mantener la sencillez de la exposición, el análisis presentado se centra en el despacho 13. Al final del mismo se analiza la situación correspondiente a los otros dos despachos.

5.1. CARACTERIZACIÓN DE VARIABLES EXÓGENAS. AJUSTE EN EVOLUCIÓN LIBRE

En lo que sigue se caracterizarán las variables exógenas del modelo. En primer lugar se caracteriza la reflectancia hemisférica del terreno colindante al C-Ddl (edificio prototipo y singular), que resulta de interés en la estimación de la irradiancia solar sobre una superficie de inclinación arbitraria. Acto seguido se aborda el problema de la estimación de la temperatura del terreno bajo el C-Ddl y la influencia de la modelización del intercambio de calor entre una edificación y el terreno sobre el que se asienta. Finalmente, se presta atención a la estimación experimental de la cobertura nubosa, de importancia en la estimación de la temperatura aparente de la bóveda celeste y con la que las edificaciones intercambian calor mediante radiación de onda larga.

5.1.1. REFLECTANCIA HEMISFÉRICA DEL TERRENO COLINDANTE AL C-Ddl

La reflectancia hemisférica del terreno se define como el cociente entre la componente de la radiación solar reflejada por el terreno y la global sobre la horizontal en el rango de longitudes de onda comprendido entre 0.3 y 3.0 μm . La reflectancia hemisférica del terreno también se conoce como albedo y su importancia es reconocida en balances energéticos que impliquen los fenómenos radiativos de onda corta. Entre dichos fenómenos se pueden encontrar el crecimiento vegetal, la estimación del potencial de evapotranspiración o la energía incidente sobre muros, ventanas o captadores solares (Muneer, 2004).

Su determinación experimental se realiza mediante un instrumento denominado albedómetro, que consiste en dos piranómetros colocados en orientación horizontal, uno de ellos apuntando hacia la bóveda celeste y el otro hacia el terreno. Este tipo de instrumentación no suele encontrarse lejos de instalaciones científicas, por lo que se han desarrollado otros métodos para la estimación del albedo, como las estimaciones a partir de imágenes de satélite para grandes áreas (Dedieu et al., 1987; EUMETSAT, 2003; Rigollier et al., 2004). No obstante, en la actualidad estos métodos no son aplicables a regiones altamente reflectivas (regiones nevadas o desiertos, por ejemplo) y no ofrecen suficiente resolución como para aplicarlos en regiones de topografía compleja y gran variabilidad espacial como es el caso del entorno urbano.

Existen numerosas fuentes en la literatura que proporcionan valores típicos de la reflectancia hemisférica para diferentes terrenos. En Europa, por ejemplo, se pueden encontrar valores tabulados del albedo en el Atlas de Radiación Solar Europeo (Aguiar and Page, 1999; Scharmer and Greif, 2000). Si se carece de datos empíricos una extendida práctica tecnológica consiste en tomar el valor del albedo de tierra desnuda sin cobertura por nieve. Su valor promedio es 0.2 (Liu and Jordan, 1963) y el Código Técnico de la Edificación lo prescribe como valor para el cálculo en todo el territorio español (CTE, 2006).

Se sabe que la distribución diurna de la reflectancia hemisférica del terreno es asimétrica respecto del mediodía y se incrementa marcadamente en valores elevados del ángulo zenital (Graham and King, 1961). Además, el albedo presenta valores matutinos menores que sus equivalentes vespertinos (Munn and Truhlar, 1963), independientemente del grado de cobertura nubosa (Stanhill et al., 1966). También se ha estudiado el efecto sobre el albedo de la variación diurna de la humedad superficial del terreno (Coulson and Raynolds, 1971), proporcionándose valores tabulados para dos tipos de suelo en diferentes condiciones a seis ángulos de incidencia de la radiación solar directa diferentes (Matthias et al., 2000). Los valores en condiciones húmedas siempre presentan valores inferiores que los medidos en condiciones más secas.

Dado que la reflectancia hemisférica del terreno es la integración sobre todo el espectro de frecuencias, se podría explicar la asimetría matutino-vespertina diaria en función de diferencias en las condiciones atmosféricas. Este efecto debería manifestarse en incrementos de partículas, aerosoles, nubosidad y vapor de agua durante la tarde. Se ha encontrado (Robertson, 1966) que durante la tarde el incremento del ángulo zenital lleva consigo un incremento en la energía de la irradiancia solar directa en la parte roja del espectro y un descenso de la energía de la irradiancia difusa en las bandas azul y ultravioleta del espectro. Asimismo, se ha comprobado que la niebla tiene un efecto similar. Otra explicación de los valores menores de la reflectancia por la mañana puede ser debida a heterogeneidades de la superficie en el ángulo de visión del albedómetro. Se ha comprobado mediante medidas tomadas por satélite, además, que efectos meteorológicos como el viento y el rocío pueden producir asimetría diurna del orden del 10% (Minnis et al., 1997).

También se ha prestado atención a la estimación correcta de la radiación solar reflejada por el terreno e incidente sobre una superficie inclinada arbitraria (Ineichen et al., 1987). En ese estudio se comprueba que tomar un valor de albedo medido “in situ” y mantenerlo constante conduce a resultados suficientemente satisfactorios. En resultados posteriores (Ineichen et al., 1990), se concluye que para la transposición a superficies de inclinación arbitraria se obtienen mejores resultados empleando la medida de un albedo medio. También se concluye que la variación de la reflectancia hemisférica del terreno es principalmente sensible al ángulo zenital con ligeras variaciones inducidas por la claridad del cielo (Perez et al., 1987).

Existen métodos recomendados para calcular la reflectancia hemisférica del terreno, que combinan por una parte las medidas de irradiancia solar total y difusa sobre la horizontal y una superficie inclinada y por otra parte modelos para estimar la componente difusa sobre una superficie inclinada (Psiloglou et al., 1997). En trabajos posteriores se evalúan diferentes modelos de estimación del albedo cerca de un área urbana (Psiloglou and Kambezidis, 2009). En dicho trabajo se emplean cerca de diez años de observaciones de irradiancia solar global y difusa sobre la horizontal y reflejada por el terreno. Se concluye con la necesidad de disponer

de medidas y/o estimaciones locales así como de la mejora de los modelos para periodos cortos de 5 a 10 minutos.

No obstante, resulta complicado encontrar series de datos largas de irradiancia solar difusa o reflejada en entorno urbano, lo que limita la aplicabilidad de los métodos anteriores a instalaciones muy especializadas. Por otra parte, el creciente número de instalaciones fotovoltaicas integradas en la edificación podrían proporcionar, en principio, información sobre la radiación reflejada en el entorno urbano. Para emplear dichos datos se requiere de un método para estimar la reflectancia hemisférica del terreno a partir de medidas de la irradiancia solar global sobre superficies inclinadas.

En los modelos de irradiancia solar sobre superficies inclinadas (Hay, 1993) se puede observar la existencia de relaciones entre la irradiancia solar global en una superficie inclinada arbitraria, la irradiancia solar directa, la difusa, la reflejada y el albedo. Así, si se mide la irradiancia solar global sobre varias orientaciones sería posible obtener el valor de la reflectancia hemisférica del terreno. En estudios pasados (Faiman et al., 1992) se han colocado multipiránómetros, formaciones de piránómetros en diferentes orientaciones, para obtener la irradiancia solar directa y difusa y la irradiancia sobre planos inclinados. Concretamente, se obtuvieron errores medios de 50W/m^2 con un multipiránómetro de cuatro orientaciones localizado en Israel.

En lo que sigue se demostrará que bajo determinadas circunstancias es posible estimar la reflectancia hemisférica del terreno a partir de medidas de irradiancia solar sobre dos superficies: la horizontal y la vertical orientada a sur. Estas orientaciones resultan particularmente comunes en el ámbito de las aplicaciones de la energía solar a la edificación. En primer lugar se emplean métodos basados en modelos detallados de las componentes de la radiación solar, demostrándose que no son capaces de resolver adecuadamente la reflectancia hemisférica del terreno, lo que se conoce como aproximación del problema directo. La reflectancia hemisférica del terreno de la Plataforma Solar de Almería se estima, entonces, a partir de los datos experimentales y una serie de hipótesis de carácter general, lo que se conoce como aproximación del problema inverso. En esta aproximación un aspecto particularmente relevante y al que hay que prestar especial atención es la técnica matemática a emplear en la estimación, dado que nos encontramos en una situación de colinealidad entre las variables medidas. Se demuestra que una técnica denominada regularización de Tikhonov (Tikhonov, 1963) es una herramienta adecuada para abordar este problema.

Para este análisis se han seleccionado cuatro series de datos experimentales, que corresponden a los siguientes intervalos: Agosto de 2009 (17 días), Septiembre de 2009 (12 días), Noviembre de 2009 (14 días) y Febrero de 2010 (13 días). El criterio seguido para la elección de los periodos es que se encontraran en funcionamiento tanto las medidas de irradiancia solar instaladas en el C-Ddl como un albedómetro situado en las inmediaciones, concretamente en el Laboratorio de ensayos Energéticos de Componentes de la Edificación

(LECE), a trescientos metros del C-Ddl (figura 4.1.). Los controles de calidad aplicados a los datos experimentales incluyen: altura solar mayor de 10° , irradiancia total sobre la horizontal mayor de 10W/m^2 y menor que la constante solar ($I_{sc} = 1367\text{ W/m}^2$), corregida por la distancia Sol-Tierra $(1 + 0.34 \cos[\frac{\pi}{360}(JD - 2)])$, JD = día del año). Asimismo, se ha calculado el índice de claridad diario (K_T^d , relación entre la irradiancia global diaria sobre la horizontal y la irradiancia solar extraterrestre sobre la horizontal) y se presenta en la tabla 5.1. Es interesante destacar que para la serie experimental de Agosto más del 25% de los días se tiene un índice de claridad por debajo de 0.5.



Figura 5.1. Vista aérea de las instalaciones de la Plataforma Solar de Almería. El rectángulo rojo representa el C-Ddl y el punto rojo la localización del albedómetro en el LECE. Fuente: Google Earth.

Serie	No. de días	K_T medio	Desv. K_T	No. de días $K_T < 0.5$
Agosto	17	0.64	0.11	4
Septiembre	12	0.61	0.15	2
Noviembre	14	0.64	0.15	2
Febrero	13	0.67	0.13	1

Tabla 5.1. Series temporales empleadas en el estudio.

En la figura 5.2 se muestra el albedo instantáneo frente al ángulo zenital para algunos días de la serie de datos experimentales (11 de noviembre, 26 de agosto y 19 de septiembre). La línea roja en la parte superior representa el valor tabulado que prescribe el Código Técnico de la Edificación para todo el territorio, que se encuentra claramente alejado de la medida, con diferencias entre 0.06 y 0.08, que representa más del 50% de diferencia entre la tabulación y la medida. Se puede observar la distribución asimétrica alrededor de la posición más elevada del Sol en la bóveda celeste.

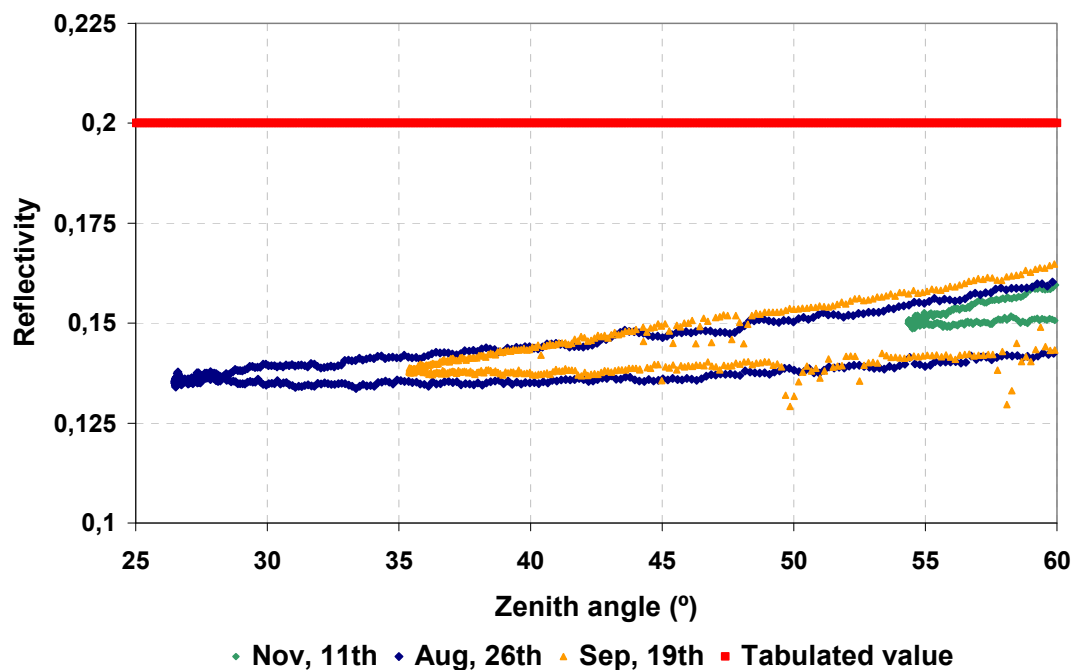


Figura 5.2. Medidas instantáneas de la reflectancia hemisférica del terreno para diferentes días. La línea roja superior representa el valor prescrito por el Código Técnico de la Edificación.

Es conveniente destacar en este punto que la exactitud de la medida de un piranómetro en operación depende de numerosos factores como la temperatura, el nivel de irradiancia o el ángulo de incidencia. El fabricante de los instrumentos empleados (piranómetros Kipp and Zonen CMP11) proporciona una incertidumbre del 2% para los totales horarios y del 1% para los totales diarios. Dado que la medida experimental de la reflectancia hemisférica del terreno

es una medida indirecta, la propagación del error de cada piranómetro involucrado se traduce en una amplitud del error de 0.02 para la medida del albedo. Este análisis refuerza la hipótesis que sugiere el empleo de un valor promedio para la reflectancia. De hecho, un valor constante y comprendido entre 0.13 y 0.14 se puede considerar una buena aproximación para la zona.

En las siguientes secciones se aborda la cuestión de cómo obtener esta reflectancia a partir de medidas experimentales de irradiancia solar global en varias orientaciones, para los casos en los que no se disponga de un albedómetro dentro del diseño experimental.

5.1.1.1. ESTIMACIÓN DEL ALBEDO MEDIANTE LA APROXIMACIÓN DEL PROBLEMA DIRECTO.

Existen numerosas aproximaciones para calcular la irradiancia solar para superficies inclinadas, que implican un tratamiento diferenciado de las tres componentes de la radiación solar incidente: la directa, la difusa proveniente de la bóveda celeste y la reflejada por el terreno. Se pueden distinguir categorías de modelos en función de la frecuencia de aplicabilidad (horario o diario) y sobre la base del flujo radiante que se modeliza (Hay, 1993). En lo que sigue se empleará el modelo para la irradiancia solar difusa implementado por Kondratyev (Kondratyev, 1977), junto con la aproximación isótropa para la radiación reflejada, lo que se formula como:

$$G_{\beta} = G_b \cos \theta_{\beta} + \frac{1}{2}(1 + \cos \beta)G_d + \frac{1}{2}(1 - \cos \beta)\rho G_0, \text{(ec. 5.1)}$$

Donde:

β = Ángulo de inclinación de la superficie i.

G_{β} = Irradiancia solar global sobre la superficie i.

G_b = Irradiancia solar directa en incidencia normal.

G_d = Irradiancia solar difusa sobre la horizontal.

G_0 = Irradiancia solar global sobre la horizontal.

θ_{β} = Ángulo de incidencia entre el Sol y la normal a la superficie i.

ρ = Reflectancia hemisférica del terreno.

De la estructura del modelo se desprende que si se conociera la reflectancia hemisférica del terreno se podrían obtener las componentes directa y difusa a partir de medidas de la irradiancia solar global en dos orientaciones diferentes. La ecuación 5.2 ilustra el cálculo, con

$\pi/2$ el ángulo de la segunda orientación. Basta asignar un valor al albedo y obtener G_b y G_d por inversión de matrices.

$$\begin{pmatrix} G_{\pi/2} \\ G_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta_0 + \frac{1}{2} \rho \cos \theta_0 & \frac{1}{2} (1 + \rho) \\ \cos \theta_0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G_b \\ G_d \end{pmatrix} \quad (\text{ec. 5.2})$$

Este argumento se puede emplear para implementar un algoritmo para estimar el albedo en tres pasos:

1. Se obtiene un conjunto completo de pares $\{G_b, G_d\}$ para cada valor del albedo, dividiendo todo el rango de validez física en intervalos lo suficientemente pequeños.
2. Se calcula el error cuadrático entre el valor G_0 medido y el calculado a partir de $G_b \cos \theta_{\pi/2} + G_d$.
3. Se selecciona aquel valor de la reflectancia hemisférica del terreno que minimice el error cuadrático.

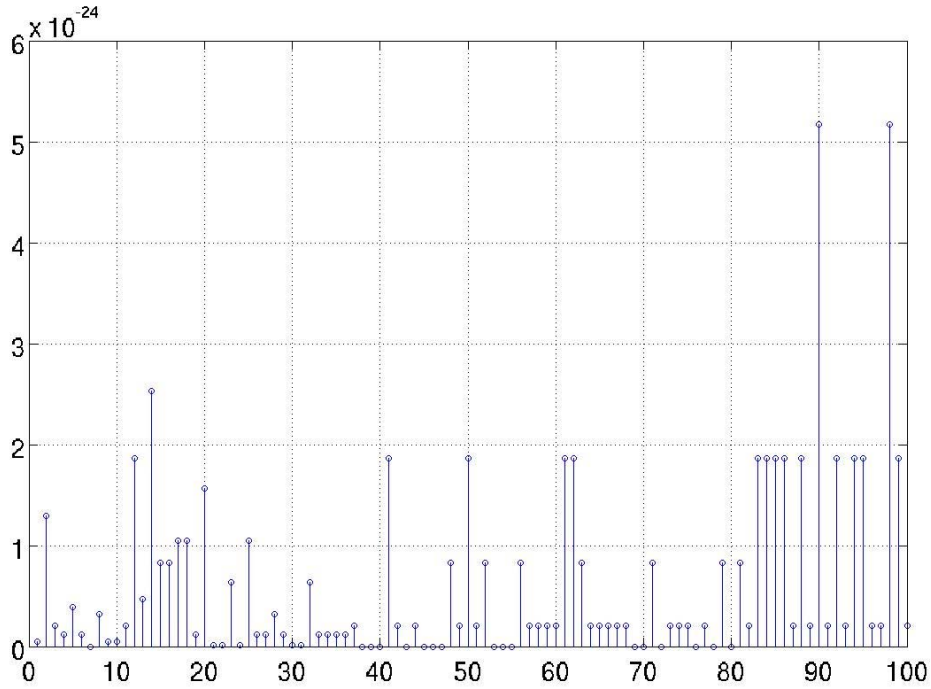


Figura 5.3. Error asociado a la estimación del algoritmo de tres pasos para el albedo a partir de medidas de la vertical y la horizontal. Ningún valor puede ser seleccionado como el correcto.

Este algoritmo se ha implementado con los valores horarios de la radiación solar global incidente sobre la horizontal y la vertical orientada al sur para un día de verano. Los valores de ρ se han tomado desde 0 hasta 1 a un paso de 0.01, que es menor que el error esperado para

la estimación. Los cálculos de la geometría solar se han tomado de las aproximaciones de Spencer (Spencer, 1971). En la figura 5.3 se muestra el error cuadrático en función de los diferentes valores de ρ . Se puede ver que se trata de una secuencia de mínimos locales distribuidos a lo largo del recorrido de los diferentes valores supuestos para el albedo. Este hecho invalida este algoritmo para la estimación del valor correcto de la reflectancia hemisférica del terreno. Se puede intentar resolver el problema añadiendo más información sobre la irradiancia solar.

Dado que el dispositivo experimental instalado en el C-DdI incluye medidas de irradiancia solar global sobre el plano de captación, se puede incluir la información en un sistema de ecuaciones análogo, del que se puede obtener el albedo por inversión de matrices. Las ecuaciones serán, entonces:

$$\begin{pmatrix} G_{\pi/2} \\ G_{\pi/9} \\ G_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{\pi/2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} I_0 \\ \cos \theta_{\pi/9} & \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi}{9} \right) & \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi}{9} \right) \\ \cos \theta_0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G_b \\ G_d \\ \rho \end{pmatrix}, (ec. 5.3)$$

El conjunto de medidas $\{G_{\pi/2}, G_{\pi/9}, G_0\}$ se puede emplear para obtener estimaciones de ρ . Esto se ha hecho para intervalos de las series temporales cerca del mediodía solar para diferentes días de los diferentes periodos y el resultado se puede ver en la figura 5.4. Se observa que la estimación es superior incluso al valor tabulado y diferente para las series de Agosto, Septiembre y Febrero. Es más, las estimaciones para Noviembre (eje derecho) no sólo son distintas a las anteriores: caen fuera del régimen de validez física.

Así, se ha demostrado que las soluciones numéricas a partir del modelo isótropo no proporcionan estimaciones precisas de la reflectancia hemisférica del terreno, ni para dos ni tres medidas de la irradiancia solar global en diferentes orientaciones.

Se podría pensar que la aproximación del problema directo se mejoraría con la introducción de modelos anisótropos para la estimación de la irradiancia sobre superficies inclinadas arbitrarias. No obstante, para emplear dichos modelos se debe conocer con detalle el tipo de anisotropía presente en la localidad para calcular los factores asociados a ella. De otro modo, no se podría distinguir entre la incertidumbre asociada a la reflectancia o a los factores de anisotropía. Este problema se agrava en situaciones de elevada variación espacial, como es el entorno urbano, el principal objetivo de este desarrollo.

Se puede concluir, entonces, que la aproximación del problema directo para estimar la reflectancia hemisférica del terreno a partir de medidas y modelo detallado, punto a punto, no es lo suficientemente buena.

La siguiente sección describe una aproximación diferente al mismo problema.

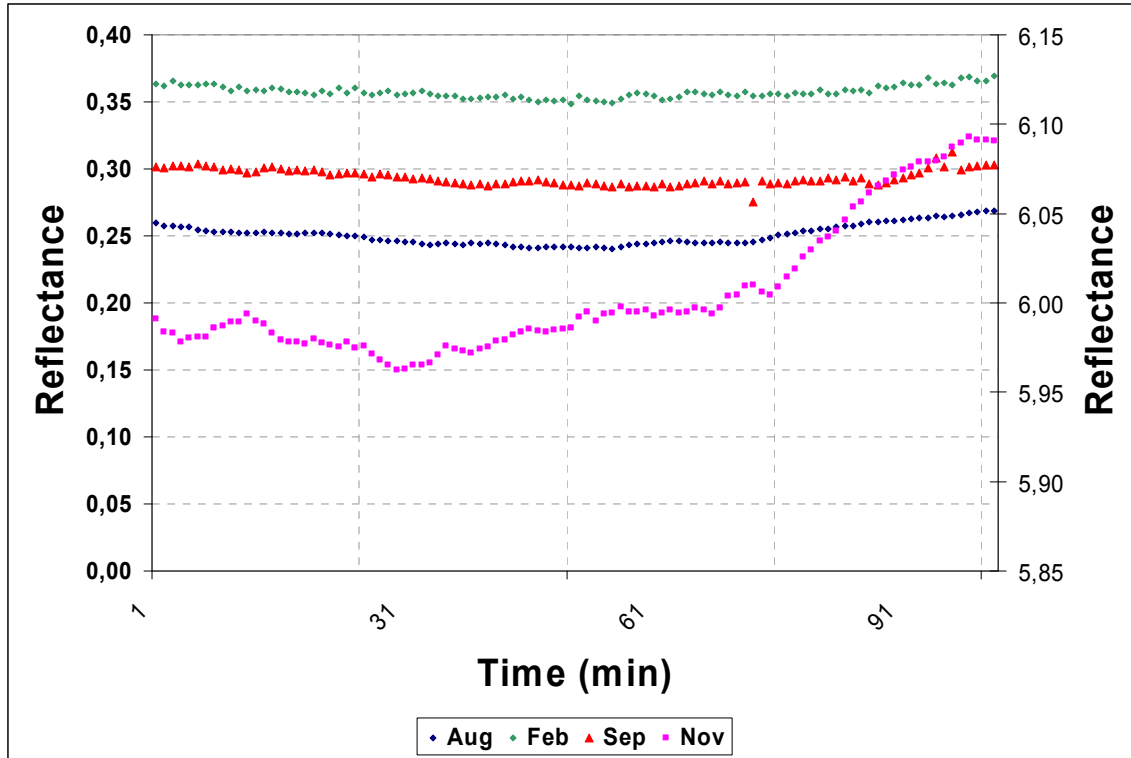


Figura 5.4. Estimaciones del albedo a partir de los datos experimentales para las tres orientaciones e inversión matricial. La estimación de Noviembre se presenta en el eje derecho y se observa que se encuentra fuera del régimen de validez física. Fuente: Enríquez, 2012.

5.1.1.2. ESTIMACIÓN DEL ALBEDO MEDIANTE LA APROXIMACIÓN DE PROBLEMA INVERSO.

En esta sección se emplea una aproximación diferente para estimar la reflectancia hemisférica del terreno. Para ello se parte del modelo isótropo para la irradiancia solar sobre la vertical orientada al sur:

$$G_{\pi/2} = G_b \cos \theta_{\pi/2} + \frac{1}{2} G_d + \frac{1}{2} \rho G_0, \text{ (ec. 5.4)}$$

Y, dividiendo por la irradiancia extraterrestre, $G_0 = I_{SC} \varepsilon \cos \theta_z = S \cos \theta_z$ (donde I_{SC} es la constante solar y ε la corrección de la distancia Tierra-Sol):

$$\frac{G_{\pi/2}}{S \cos \theta_z} = \frac{G_b \cos \theta_{\pi/2}}{S \cos \theta_z} + \frac{I_d}{2S \cos \theta_z} + \frac{1}{2} \rho K_T^h, \text{ (ec. 5.5)}$$

donde K_T^h es el índice de claridad horario (cociente horario entre la irradiancia global sobre la horizontal y la irradiancia extraterrestre sobre la horizontal). Desde hace décadas numerosos estudiosos se han ocupado en desarrollar relaciones lineales entre el índice de claridad y la

fracción de irradiancia difusa para diferentes condiciones de cielo ($\sim 0.3 < K_T^h < \sim 0.8$) (Orgill and Hollands, 1977; Reindl et al., 1990). Entonces, la ecuación 5.5 se puede reescribir como:

$$\left[\frac{G_{\pi/2}}{S \cos^2 \theta_z} \right] = \gamma_b \left[\frac{\cos \theta_{\pi/2}}{S \cos \theta_z} \right] + \gamma_d \left[\frac{1}{2S \cos \theta_z} \right] + \gamma_\rho \left[\frac{K_T^h}{2} \right], (ec. 5.6)$$

con γ_b , γ_d , γ_ρ coeficientes dependientes de la irradiancia directa, irradiancia difusa y reflectancia del terreno, respectivamente. Las cantidades entre corchetes o bien se miden directamente o bien se pueden calcular analíticamente.

Para incluir la información relativa a las correlaciones de irradiancia difusa se filtran las series de datos. Solamente aquellos datos cuyo K_T^h supere un cierto umbral se incluyen en la estimación. Bajo esas hipótesis el coeficiente γ_ρ corresponde exactamente con ρ y se puede estimar por regresión lineal múltiple.

Sin embargo, el valor preciso de K_T^h para el que se verifica la correlación de irradiancia difusa depende de una variedad de factores, como son el ángulo cenital (Skartveit and Olseth, 1987) y/o la correlación multilíneal (Reindl et al., 1990); valores para la región se pueden encontrar en la literatura (de Miguel et al., 2001). Por ello, el coseno del ángulo cenital se introduce al cuadrado en el denominador, para corregir el término relativo a la irradiancia global sobre la vertical. Para solventar este problema, se realizan estimaciones para diferentes conjuntos de la serie de datos experimentales, filtrados por valores umbral del índice de claridad y se escoge aquel que mejor se ajuste a los datos experimentales. Es importante destacar en este punto que elevados valores de K_T^h aparecen a elevados ángulos cenitales, donde los modelos isótropo y anisótropo presentan menores diferencias. Por ello, aunque se haya empleado el modelo isótropo en la formulación del problema las hipótesis empleadas (correlación de difusa y valor umbral del índice horario de claridad) dotan al método de completa generalidad.

Esta aproximación está comprendida en lo que se conoce matemáticamente como Teoría de Problemas Inversos (Tarantola, 2005), donde se estudia la posibilidad de estimar parámetros físicos a partir de datos experimentales y de modelos conocidos. Un aspecto de especial relevancia, en el contexto de esta teoría, es el relativo a la correlación existente entre las variables de entrada del modelo. En caso de que exista correlación entre las variables de entrada del modelo las estimaciones de los parámetros serán muy sensibles a la varianza de los datos, lo que proporcionará inestabilidad en la estimación y probablemente estimaciones fuera del rango de validez física.

Para detectar este fenómeno, se calcula el número asociado a la condición (condition number) de la matriz de covarianza de los datos experimentales, que se define como la raíz cuadrada del cociente entre el máximo y el mínimo autovalor de dicha matriz. Si dicho número es superior a un determinado umbral (habitualmente 30 se considera suficientemente indicativo

del fenómeno), la correlación entre las variables de entrada producirá inestabilidades en la estimación de los parámetros.

Sin necesidad de cálculos matemáticos, se sabe que la irradiación solar sobre superficies arbitrariamente orientadas muestra un elevado grado de correlación. Este hecho se ve confirmado por la condición de las matrices de covarianza de las series de datos experimentales; mucho mayor que 30 para todas las series seleccionadas.

Una vez que se ha detectado la multicolinealidad entre las variables de entrada al modelo se debe sustituir la técnica de estimación por otra más apropiada. La revisión bibliográfica informa de diferentes aproximaciones para tratar este fenómeno. Cuando se trata de un elevado número de variables de entrada se ha demostrado que el Análisis de Componentes Principales es una buena herramienta (Ndiaye and Gabrielb, 2011; Mejri et al., 2011). Otras aproximaciones que se han demostrado útiles es considerar efectos físicos adicionales en el modelo, tales como causalidad en la forma de modelos multisalida (Jiménez and Heras, 2005), la inclusión de efectos no lineales (Jiménez and Madsen, 2008), la introducción de dependencias temporales explícitas en los parámetros (Enriquez et al., 2008) o incluso consideraciones físicas adicionales acerca del comportamiento de los sensores empleados en el estudio (Jiménez et al., 2008).

En la investigación que aquí se presenta se realiza una novedosa aproximación en este campo mediante una técnica matemática conocida como regularización de Tikhonov, que se describe con detalle en la siguiente sección, junto a la técnica de las L-curvas para la selección del parámetro de regularización. Desde su primera aparición, hace casi cincuenta años (Tikhonov, 1963), esta técnica se ha aplicado con éxito en numerosas y diversas disciplinas científicas. Un breve repaso a la literatura más reciente, sin pretender ser exhaustivo, muestra la gran penetración que ha tenido en campos como experimentos de dispersión (Liu et al., 2001), tomografía (Lei et al., 2011; Wang and Wang, 2011; Lee et al., 2010), resonancia magnética (Day, 2011), detección de daños en estructuras (Ronasi, 2011; Li and Law, 2010), transporte de aerosoles (Royer et al., 2010), problemas inversos de conducción del calor (Tian et al., 2011; Bourquin and Nassiopoulos, 2011; Yang and Fu, 2010a; Yang and Fu, 2010b, Pourgholi and Rostamian, 2010, Egger et al., 2009), arqueología (Schaffrin and Snow, 2010), electrónica (Idemen and Alkumru, 2010), optimización multiobjetivo (Chen et al., 2009), procesos de solidificación (Sui and Cui, 2009), procesado de Imágenes (Bouhamidi and Jbilou, 2007), o valoración de opciones de mercado (Egger and Engl, 2005).

Para cada conjunto de datos experimentales se han realizado seis estimaciones de la reflectancia hemisférica del terreno. Para cada una de las estimaciones la serie de datos experimentales se ha filtrado a aquellos valores de K_T^h mayores que un umbral fijado de antemano. Los seis umbrales escogidos recorren el intervalo comprendido entre 0.75 y 0.8 a intervalos de 0.01. En la figura 5.5 se muestran las diferentes L-curvas correspondientes a la

regularización de Tikhonov de las seis series filtradas correspondientes a los datos experimentales de noviembre. Para los valores elevados del parámetro de regularización las curvas tienden a valores similares, lo que es una prueba de la estabilidad de la estimación. También se puede ver que mientras mayor es el umbral escogido para K_T^h la curva tiene más forma de L, lo que es un indicativo de que las hipótesis de correlación difusa es más fuerte mientras más claro es el cielo. Para valores del índice de claridad por debajo de 0.79 la L-curva es demasiado suave, lo que indica que el error introducido por la regularización podría ser demasiado grande. La L-curva correspondiente a índices de claridad iguales o superiores a 0.8 muestra un comportamiento como el esperado a partir de las hipótesis del método. La reflectancia hemisférica del terreno asociada a esta situación es 0.14, un valor cercano al medido experimentalmente y mostrado previamente en la figura 5.2.

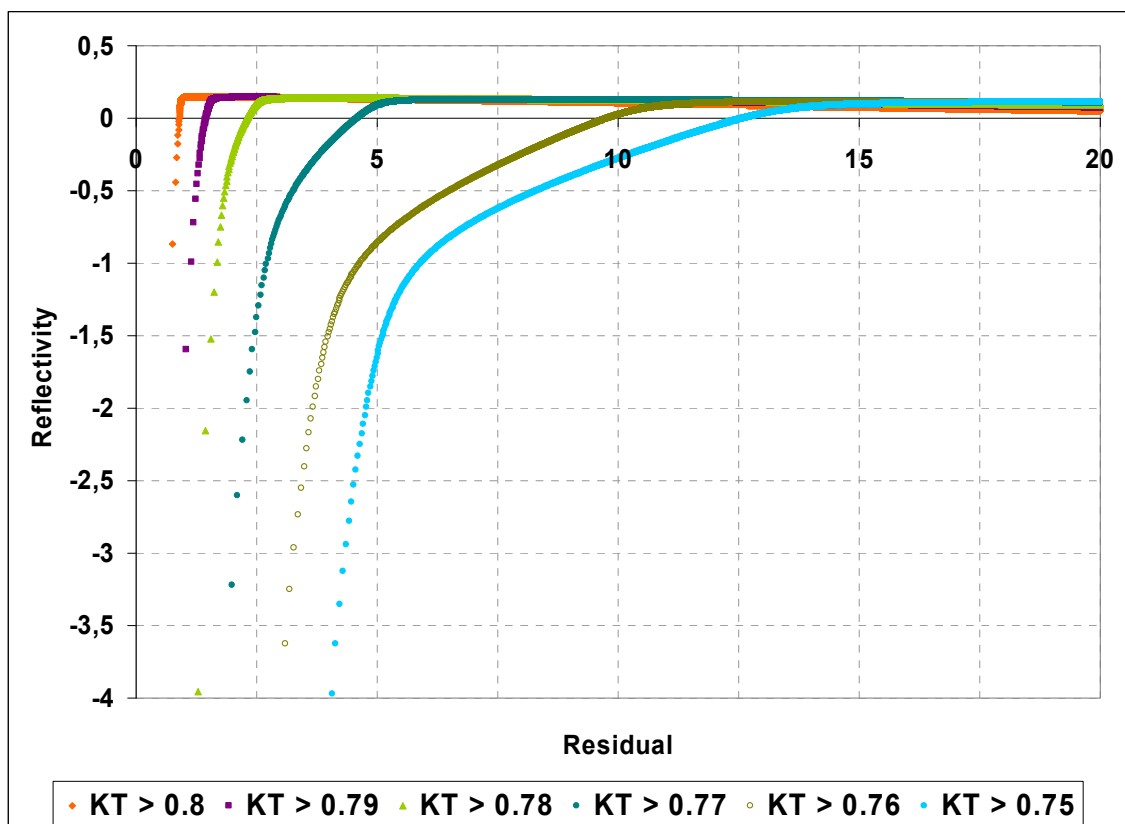


Figura 5.5. L-curvas para la estimación de la reflectancia hemisférica del terreno para los datos de Noviembre, filtrados por valores de K_T^h .

Es conveniente destacar que las estimaciones del albedo para valores pequeños (o cero) del parámetro de regularización son negativas y físicamente inaceptables. Esto es otra prueba de que unas hipótesis físicas suficientemente buenas requieren de un marco matemático adecuado para la correcta estimación de los parámetros. Patrones similares emergen para las estimaciones con las series temporales de septiembre y de febrero, que no se muestran aquí. Los resultados se resumen en la tabla 5.2. En dicha tabla se presenta el umbral escogido para el índice de claridad, junto a las estimaciones de la reflectancia hemisférica del terreno

mediante la regularización de Tikhonov y mediante regresión lineal múltiple (parámetro de regularización igual a cero). El umbral considerado válido para todas las series de datos experimentales es 0.8. También es conveniente destacar que las estimaciones regularizadas para la reflectancia hemisférica del terreno son consistentes entre diferentes series de datos experimentales, de acuerdo con la situación física modelizada.

	KT	ρ (Regularizada)	ρ (Regresión Múltiple)
Agosto	N/A	N/A	N/A
Septiembre	> 0.8	0.14	0.36
Noviembre	> 0.8	0.14	-4.15
Febrero	> 0.8	0.14	-3.28

Tabla 5.2. Resumen de los resultados para las diferentes series temporales analizadas.

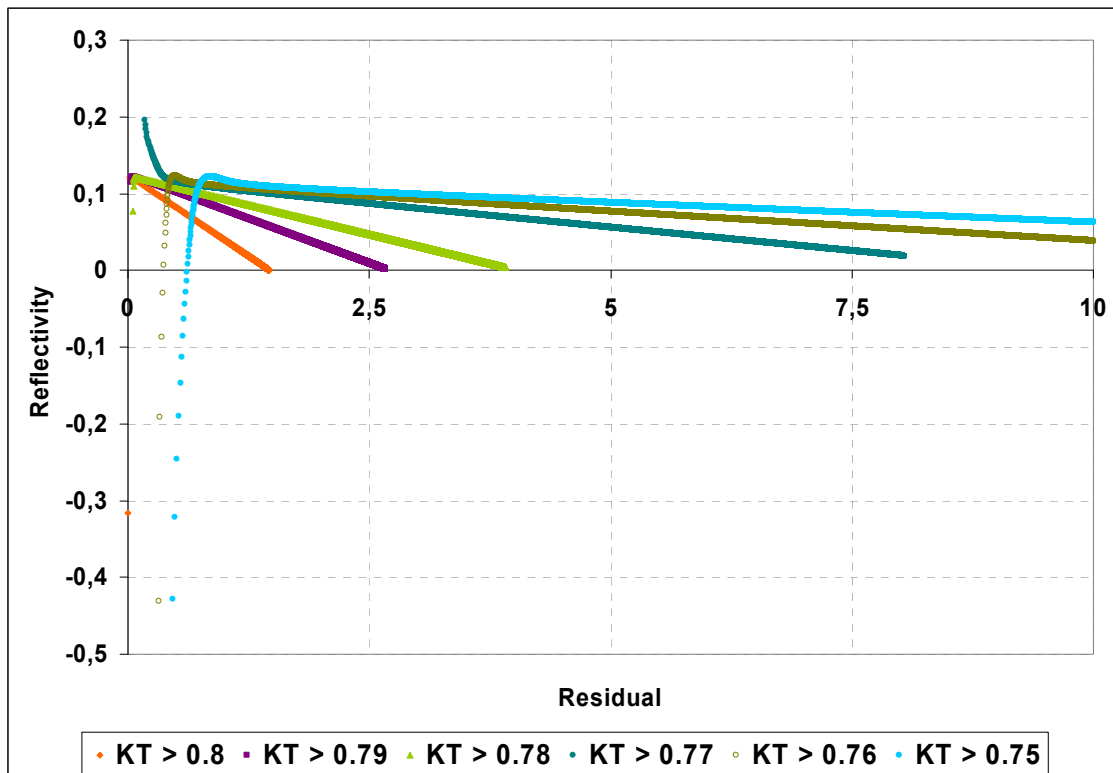


Figura 5.6. L-curvas para la estimación de la reflectancia hemisférica del terreno para la serie de datos experimentales de Agosto, filtrada por valores de K_T^h .

Las curvas resultantes de la aplicación de este método a los datos de Agosto se muestran en la figura 5.6, donde se puede observar que exhiben un comportamiento netamente distinto. Las curvas de estimación en función del parámetro de regularización muestran ahora diferentes tendencias en función del umbral seleccionado para el índice de claridad. Ninguna de ellas presenta, de hecho, la forma esperada de acuerdo a las hipótesis introducidas. De hecho, según crece el parámetro de regularización la estimación del albedo se acerca a cero, en lugar de a un valor estable. Este hecho indica que la estimación no puede considerarse suficientemente buena, a pesar del hecho de que estimaría valores cercanos a 0.12 en el punto

de máxima curvatura. Esta serie debe desecharse para la estimación de la reflectancia hemisférica del terreno.

Si se vuelve al control de calidad de los datos experimentales presentado en la tabla 5.1 se puede observar que la serie de datos de agosto muestra un mayor porcentaje de días con un índice de claridad inferior a 0.5 (cerca del 25%), mientras que el resto de las series presentan valores más estables del índice de claridad diario, K_T^d . Se puede descartar el fallo en la medida experimental, ya que los datos provenientes del albedómetro presentan la misma varianza que los obtenidos del C-Ddl, tratándose además de diferentes instalaciones experimentales separadas por cerca de trescientos metros. No puede descartarse que sucediera un fenómeno atmosférico durante aquellos días que invalidara la hipótesis de correlación de difusa o de isotropía. En cualquier caso, debe verse como una fortaleza del método el hecho de que permita identificar de forma sencilla datos no válidos para la estimación.

El mismo procedimiento se ha aplicado tomando la medición sobre el plano de captación en lugar de la vertical orientada al sur. Este se puede hacer de una forma sencilla simplemente con la sustitución de la ecuación 6 por una análoga con los términos correspondientes de irradiancia ($G_{\pi/9}$ en lugar de $G_{\pi/2}$ y las correcciones apropiadas debidas a la inclinación de la superficie). En ese caso ninguna de las estimaciones para los diferentes periodos seleccionados proporciona resultados aceptables, obteniéndose curvas que no respetan la hipótesis de regularización introducida. Este hecho sugiere que existe un ángulo límite para la validez del método, aspecto que debe investigarse en mayor profundidad para la generalización del método.

5.1.1.3. LA REGULARIZACIÓN DE TIKHONOV Y EL MÉTODO DE LAS L-CURVAS

Se dice que un problema está bien condicionado (well-conditioned) si tiene solución única y estable ante pequeñas variaciones en los datos de entrada. En caso contrario, se dice que está defectuosamente condicionado (ill-conditioned). La mayoría de los problemas inversos están defectuosamente condicionados. El problema inverso de estimar parámetros (codificados en un vector β) a partir de una serie de medidas (codificadas en un vector columna Y y una matriz X) se puede formular como:

$$Y = X^t \beta, \text{(ec. 5.7)}$$

y obtener β tras algunas manipulaciones algebraicas:

$$\beta = (X^t X)^{-1} X^t Y \text{ (ec. 5.8),}$$

si la matriz $(X^t X)$ es cercana a ser singular, se dice que el problema está defectuosamente condicionado. La forma numérica de comprobarlo es a través del llamado número de condición (condition number). En número de condición para una matriz M se define como:

$$\sqrt{\frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}}}, (\text{ec. 5.9})$$

donde λ_{\max} y λ_{\min} son el máximo y el mínimo autovalor de M , respectivamente. De forma práctica, un número de condición mayor que 30 se puede considerar prueba de defecto en la condición.

Este fenómeno puede derivar en predicciones inestables para el vector de parámetros β . Para resolver este problema, β se reemplaza por:

$$\hat{\beta} = (X^t X + \varphi I)^{-1} X^t Y, (\text{ec. 5.10})$$

Donde I es la matriz identidad y $\varphi > 0$ un escalar. A este proceso se le conoce como regularización de Tikhonov y a φ como factor de regularización. Nótese que para $\varphi = 0$ no hay regularización en absoluto.

Ahora las estimaciones de los parámetros dependen de φ . Dado que φ es un número real mayor que cero, el término $\varphi * I$ "contrae" todas las componentes de $\hat{\beta}$ según φ crece. El método para escoger el factor de regularización es un campo de investigación activo en la actualidad (Rezghi and Hosseini, 2009; Bauer and Lukas, 2011; Renaut et al., 2010). Una manera popular de escoger el factor de Tikhonov consiste en representar las componentes de $\hat{\beta}$ frente a φ y escoger el punto a partir del que se estabilizan. En la figura 5.7 se muestra una de estas representaciones típicas.

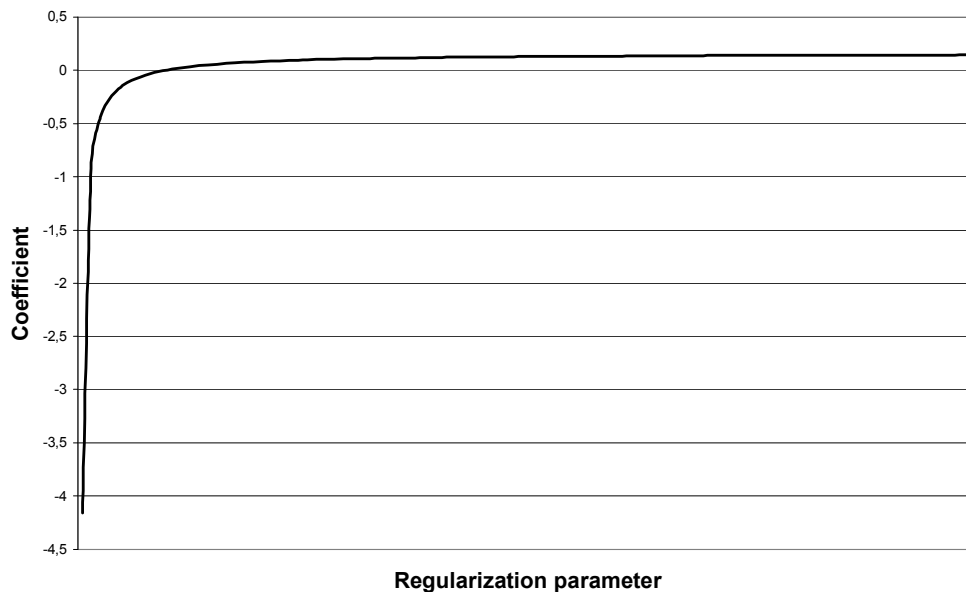


Figura 5.7. Representación típica de la traza de un parámetro frente al factor de regularización.

Se puede observar que hay dos intervalos claramente diferenciados. En el primero aparece una gran variación de las componentes y en el segundo una gran estabilidad para las mismas. El factor de regularización debe encontrarse en algún punto en la frontera de los dos intervalos. Una manera de encontrar ese punto sería imponer una determinada tolerancia para la estabilidad de los parámetros.

Otra manera de tener en cuenta este fenómeno consiste en representar las componentes de $\hat{\beta}(\varphi)$ frente a la norma del residuos $|y - \hat{\beta}(\varphi)X|$ en la forma de pares coordenados. Se espera que este tipo de diagrama sea casi vertical en el intervalo de gran variación de las componentes de $\hat{\beta}$ y de pequeña variación del residuo y horizontal cuando se presente una ligera variación de las componentes asociada a una gran variación del residuo. Estas dos ramas unidas tienen la forma de una L, por lo que a esta familia de representaciones se las denomina L-curvas. La estrategia de elección del factor de regularización es acercarse lo más posible a la esquina de la L. A este método de selección del factor de regularización se le denomina el método de las L-curvas. La figura 5.8 muestra una típica L-curva para estimación.

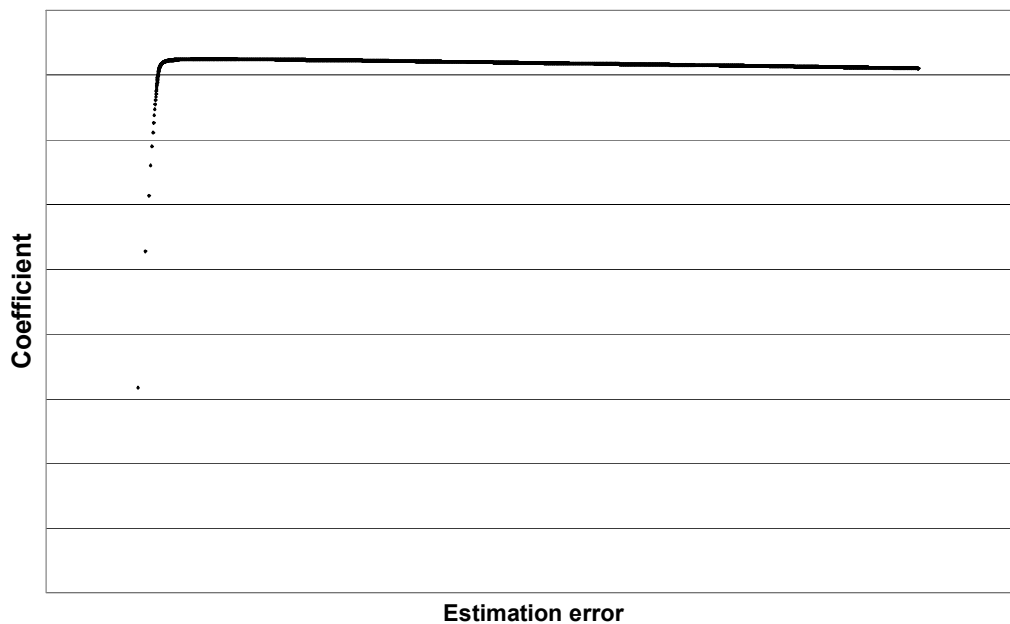


Figura 5.8. Típica L-curva para la estimación del factor de regularización.

5.1.2. TEMPERATURA DEL TERRENO BAJO EL C-DdI

Como se ha demostrado en el capítulo dedicado al diseño experimental la temperatura del terreno bajo el C-DdI es una variable de gran relevancia. A diferencia de la temperatura del aire, la temperatura del terreno bajo el C-DdI se ve influida por éste, debido a la elevada inercia térmica que presenta. Estudios pioneros demuestran empíricamente que el fenómeno de intercambio de calor a través de un sótano dista de la aproximación de conducción unidimensional (Latta y Boileau, 1969). De hecho, posteriormente (Wang, 1979; Bligh y col.,

1978) se observa que el flujo de calor a través de un suelo de cemento se produce principalmente a través del perímetro, con el flujo de calor proporcional al mismo. Posteriormente, mediante el empleo de modelos en diferencias finitas se calculó la conductancia térmica del perímetro por unidad de perímetro (Huang, 1988) para diferentes situaciones, entre ellas sótanos y construcciones en planta sobre el terreno.

La estimación de la temperatura del terreno sobre el que se asienta el edificio se vuelve, entonces, de la mayor relevancia si se desea estimar dicho intercambio energético. Para estimarla se parte de la aproximación de campo lejano, o sea se estima la temperatura del terreno sin perturbar el edificio y se impone ésta como condición de contorno para el cálculo de la transferencia de calor. Si se supone el terreno como un sólido semiinfinito sometido a una perturbación de temperatura periódica en su superficie la temperatura a una profundidad determinada se puede, entonces, calcular analíticamente (Carslaw y Jaeger, 1959). De hecho, tras la validación de esta expresión en una serie de estaciones meteorológicas situadas en los Estados Unidos se ha convertido en una de las expresiones más empleadas para la evaluación de la temperatura del terreno es la siguiente relación empírica (Kusuda, 1968):

$$T_{z,n} = T_m - T_a \exp\left\{-z\sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}\right\} \cos\left\{\frac{2\pi}{365}\left(n - n_0 - \frac{z}{2}\sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}}\right)\right\}, \text{ (ec. 5.11)}$$

donde,

$T_{z,n}$ = Temperatura del suelo a profundidad z (m.) en el Día Juliano n .

T_m = Temperatura media anual.

T_a = Amplitud de la variación anual de la temperatura ambiente.

α = Difusividad térmica del suelo (m²/h).

n = Día Juliano.

n_0 = Constante de fases (días), con argumento del coseno en radianes.

Esta relación permite conocer la temperatura del terreno a una profundidad z si se conocen las temperaturas en la superficie, la difusividad térmica y el día del año que presenta el mínimo de temperaturas. Con posterioridad, se estudiará el efecto de los fenómenos radiativos y convectivos en la superficie (Mihalakakou, 1997), resultando de especial relevancia en las capas más superiores del terreno.

Con las condiciones de contorno caracterizadas, se puede resolver el problema del intercambio de calor entre el interior de un edificio y el terreno sobre el que se asienta mediante la solución de la ecuación del calor en dicho medio. El caso resulta de resolución más sencilla si se supone el estado estacionario (Anderson, 1991; Anderson, 1993), estudios que han llevado a la generación de la norma europea para la transmisión del calor a través de los cerramientos de edificios en contacto con el terreno (ISO, 1998). Las situaciones dinámicas también se han abordado en otros trabajos con el desarrollo de modelos bidimensionales y tridimensionales

(Adjali, 2000) y modelos tridimensionales para la respuesta a un impulso periódico (Chuangchid, 2000). La influencia de la presencia de movimientos de agua también se incluye en modelos más recientes (Janssen, 2004) y con la aplicación para el modelo de suelo de Philip y De Vries (dos Santos, 2006; Philip Philip y De Vries, 1957). La intensa actividad investigadora alrededor de este tópico se muestra en el hecho de que una de las subtarefas de la tarea 38 del acuerdo de implementación sobre calor y frío solar de la Agencia Internacional de la Energía se dedica exclusivamente a la modelización del intercambio de calor entre los edificios y el terreno (Neymark y Judkoff, 2008). Es conveniente destacar en este punto que todos los estudios realizados sobre modelización del intercambio de calor entre edificios y terreno fueron de intercomparación teórica, sin validación experimental alguna.

Recientemente, la literatura informa (Andolsun, 2011) de que Winkelmann (Winkelmann, 2002) ha revisado el trabajo de Huang y ha demostrado que es suficiente añadir una resistencia térmica efectiva para poder considerarlo con suficiente precisión un problema unidimensional. En lo que sigue y, dado que los parámetros del cerramiento del C-Ddl que está en contacto con el terreno son susceptibles de ajuste, ésta será la aproximación que se seguirá.

La cuestión que sigue es la elección de la temperatura del terreno a colocar como condición de contorno en el modelo de simulación o, lo que es lo mismo, a qué distancia del cerramiento se puede emplear la relación de Kusuda con suficiente fiabilidad. Un estudio reciente (Mazorrón y Canas, 2008) demuestra que la evolución de la temperatura del aire interior de bodegas enterradas en la Ribera del Duero a un mínimo de tres metros de profundidad sigue una ley completamente análoga a la de Kusuda. En el C-Ddl se dispone de medidas de la temperatura del terreno a dos profundidades (0.5 y 1 m, respectivamente) repartidas en diferentes puntos del edificio e, incluso, en el exterior del mismo. En las figuras 5.9 y 5.10 se compara la temperatura del terreno medida bajo la planta del edificio y medida en el exterior para una profundidad de 0.5 y 1 m, respectivamente, correspondiente a los datos experimentales de 2009. La franja rosa representa una interrupción de servicio de toma de datos. Se puede observar, en primer lugar, que la medida menos profunda presenta una oscilación mucho mayor que la más profunda, mucho más influida por los fenómenos de intercambio de calor radiativos y convectivos en la superficie. Asimismo, en ambos casos la temperatura medida fuera de la proyección en planta del C-Ddl presenta una oscilación más acusada. En el caso de la medida más profunda, además, la separación de la medida exterior con respecto a la interior se acusa en verano, mostrando un marcado efecto de la irradiancia solar durante el periodo estival. Dado que la relación de Kusuda se deduce bajo la hipótesis de excitación periódica en temperatura, **las medidas de la temperatura del terreno tomadas en la proyección en planta del C-Ddl se acogen mejor a las hipótesis de modelo puramente conductivo que las tomadas en el exterior.**

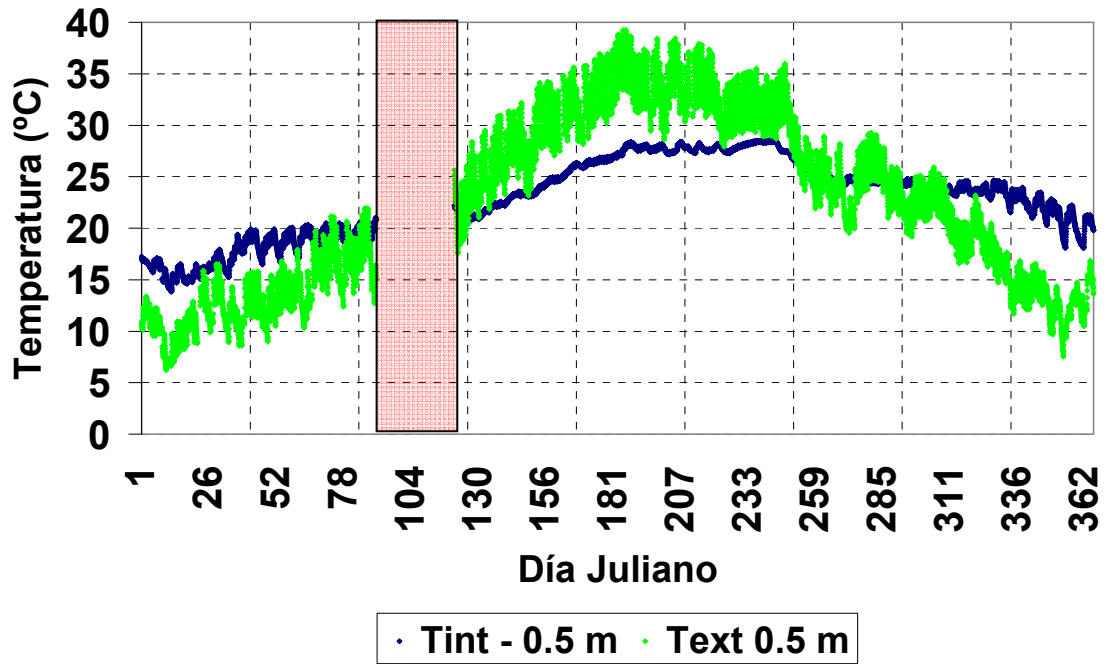


Figura 5.9. Medidas de temperatura a 0.5 m de profundidad sobre la planta del C-Ddl y fuera de la proyección en planta del mismo. Datos correspondientes a 2009.

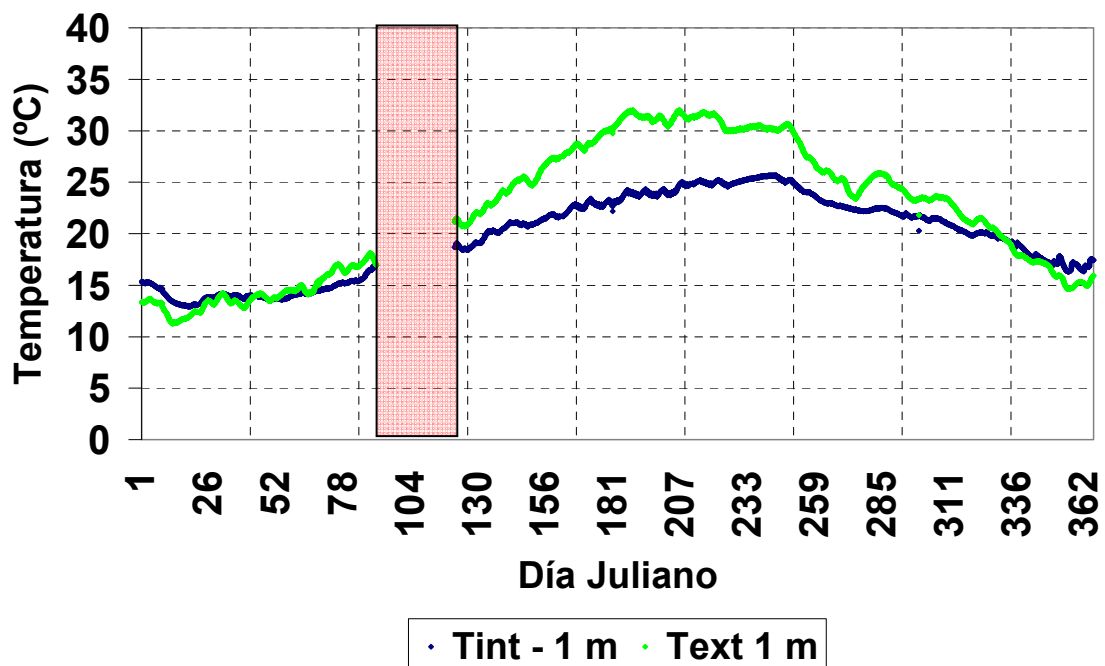


Figura 5.10. Medidas de temperatura a 1 m de profundidad sobre la planta del C-Ddl y fuera de la proyección en planta del mismo. Datos correspondientes a 2009.

Por otra parte, las medidas que se obtienen de los sensores que se encuentran a 0.5 m de profundidad en la proyección en planta del edificio se encuentran más perturbadas por el efecto de la temperatura interior del edificio, como se puede comprobar en la figura 5.11, para el

despacho de becarios. **La perturbación por climatización, además, no respeta las hipótesis de periodicidad del modelo propuesto, por lo que para minimizar los efectos de la perturbación de la temperatura bajo el C-Ddl por la operación del mismo se toma la temperatura a la profundidad de un metro.**

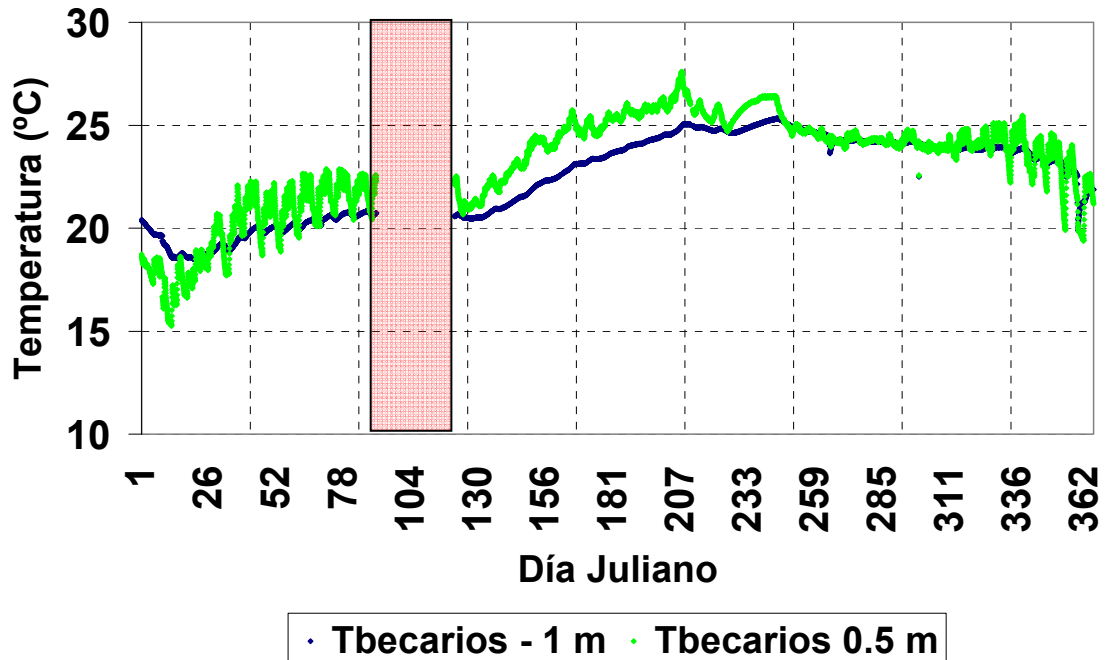


Figura 5.11. Medidas experimentales de la temperatura bajo el C-Ddl a dos profundidades, la más superficial perturbada por la climatización del edificio. Datos experimentales correspondientes a 2009.

Dado que la forma funcional de la relación de Kusuda es lo suficientemente sencilla, se puede realizar un ajuste de la función $f(t) = A + B \sin(Ct + D)$ a los datos experimentales, con A , B , C y D constantes a determinar. Así, una vez después de dicho ajuste se puede, conocida la amplitud de la oscilación térmica anual y la profundidad a la que se encuentra el sensor, relacionar el coeficiente B de la relación anterior con la difusividad térmica efectiva del terreno bajo el C-Ddl.

El ajuste de la relación anterior se encuentra dentro del ajuste no lineal de curvas, para lo que existen algoritmos específicos. En este caso los algoritmos de Gauss-Newton y de Levenberg-Marquart no han convergido, incluso en el caso de estimación robusta. Se ha empleado el método de regiones de confianza (trust region) para realizar las estimaciones de los parámetros de las curvas.

La tabla 5.3 muestra los resultados de dicho ajuste para los datos disponibles y la figura 5.12 muestra gráficamente uno de ellos, observándose un buen ajuste de la función a los datos experimentales.

	α (0.5 m) (m ² /h)	α (1 m) (m ² /h)	R^2 (0.5 m)	R^2 (1 m)
d04	-	0.0023	-	0.9751
Becarios	0.0024	0.0020	0.8414	0.9361
Control	0.0005	0.0019	0.9272	0.9853
Auditorio	0.0012	0.0033	0.9863	0.9955
Descanso	0.0012	0.0045	0.9106	0.9732
Exterior	0.0054	0.0119	0.9166	0.9831

Tabla 5.3. Difusividades térmicas efectivas bajo el C-Ddl mediante el ajuste de la relación de Kusuda.

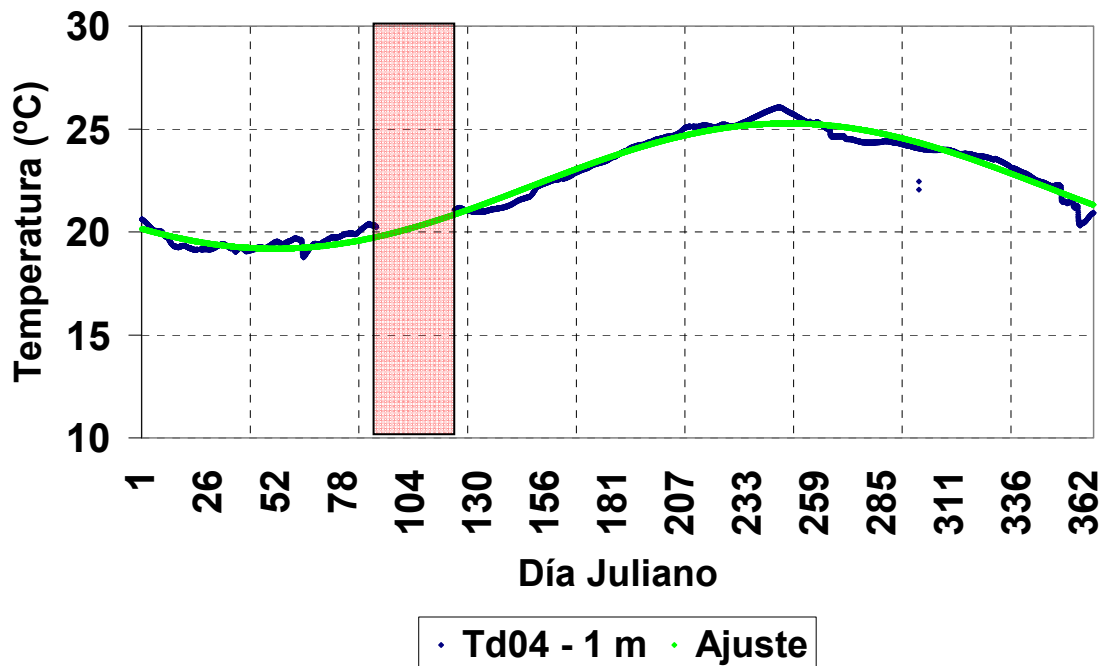


Figura 5.12. Ajuste de la función $f(t) = A + B \sin(Ct + D)$ a datos experimentales.

Se puede observar que las estimaciones de la difusividad térmica efectiva del terreno bajo el C-Ddl dependen de la localización tomada para su ajuste y presentan mayor acuerdo las estimadas a mayor profundidad. Asimismo, presentan mejores ajustes las series de temperatura que se encuentran bajo estancias de ocupación (y, por consiguiente, de climatización) más esporádica. No obstante, pese a presentar un mejor ajuste, las estimaciones en esos casos ofrecen diferentes difusividades térmicas efectivas a diferentes profundidades, al contrario de lo que sucede en las estancias ocupadas (despacho 04 y despacho de becarios). Esto indica que los regímenes de ocupación más estables se ajustan mejor a las hipótesis barajadas de excitación periódica en superficie. Los valores, asimismo, se encuentran cerca de los valores tabulados para grava rodada y arenas húmedas prensadas, lo que se encuentra dentro de los parámetros de validez física. Por ello, se escoge la temperatura bajo el C-Ddl a un metro de profundidad por debajo del despacho 04 para el ajuste del modelo de simulación, por presentar ésta mejor ajuste que la del despacho de becarios.

En cualquier caso, hay que destacar que el error experimental asociado a estas medidas es notablemente superior al de otros sensores instalados, en primer lugar porque los sensores instalados se encuentran en una operación para la que no han sido diseñados y, en segundo lugar, porque el asentamiento del propio C-DdI una vez construido ha podido desplazar la posición de algunos de los sensores.

Se ha escogido la medida experimental en lugar de la estimación teórica precisamente debido al error asociado a la misma. En la figura 5.13 se presenta el ajuste realizado para el despacho 04, pero esta vez para un intervalo mayor de datos experimentales, desde mediados de 2008 hasta principios de 2012. Se puede observar claramente cómo la estimación se desfasa de la situación real a medida que pasa el tiempo, aunque la amplitud de la oscilación permanece constante. Esto es debido a que algunos de los parámetros estimados en la función propuesta contienen error debido al ruido.

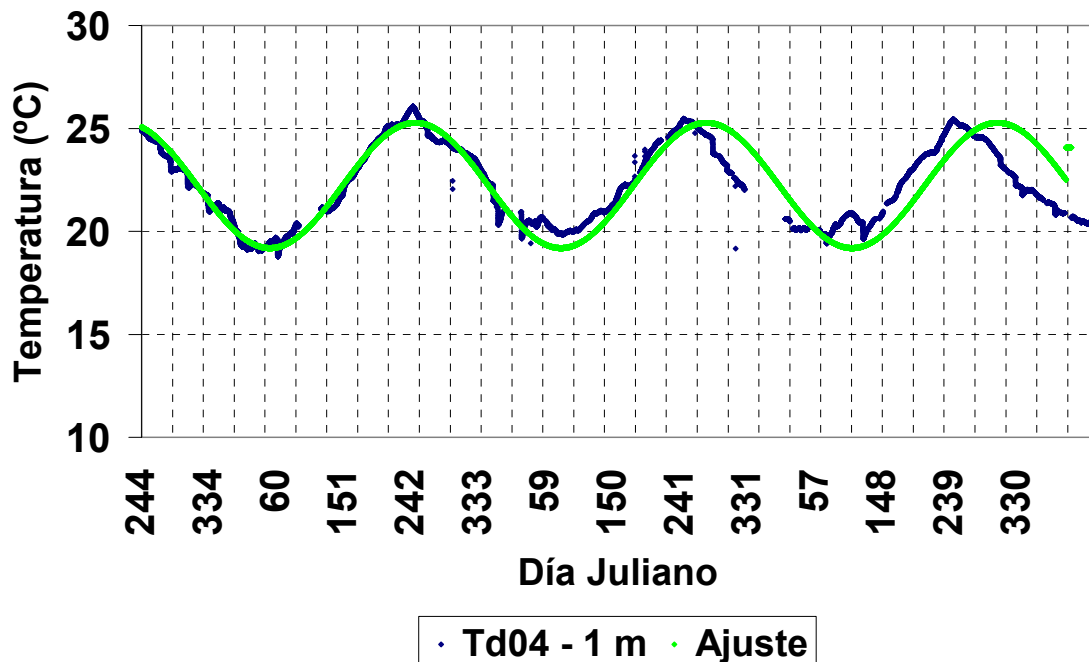


Figura 5.13. Proyección del ajuste realizado para medidas del 2009 al resto de la serie de datos experimentales. Se observa desfase a los dos años debido a la influencia del ruido en la estimación de los coeficientes.

En cualquier caso, **se puede concluir que para la evaluación energética experimental de edificaciones en general se requiere de, al menos, una medida de temperatura bajo el edificio y situada a una profundidad de al menos un metro.**

5.1.3. INTERCAMBIO DE ONDA LARGA EN EL EDIFICIO SINGULAR (C-DdI)

La atmósfera es una envoltente gaseosa que rodea la Tierra, que la sujeta por el efecto de su campo gravitatorio. Alcanza su máximo de densidad cerca de la superficie sólida de la Tierra y se vuelve más tenue conforme aumenta la altitud, hasta que finalmente se vuelve indistinguible

del medio interplanetario. Por este hecho no se puede definir un límite superior para la atmósfera. A medida que se aleja de la superficie de la Tierra se definen diferentes regiones con muy distintas propiedades físico-químicas.

La atmósfera es transparente a la radiación de onda larga emitida por la superficie de la Tierra en ciertos intervalos de la longitud de onda, particularmente en un rango espectral que cubre aproximadamente el intervalo comprendido entre 8 y 14 micrómetros, a lo que se denomina la ventana atmosférica principal (figura 5.14.).

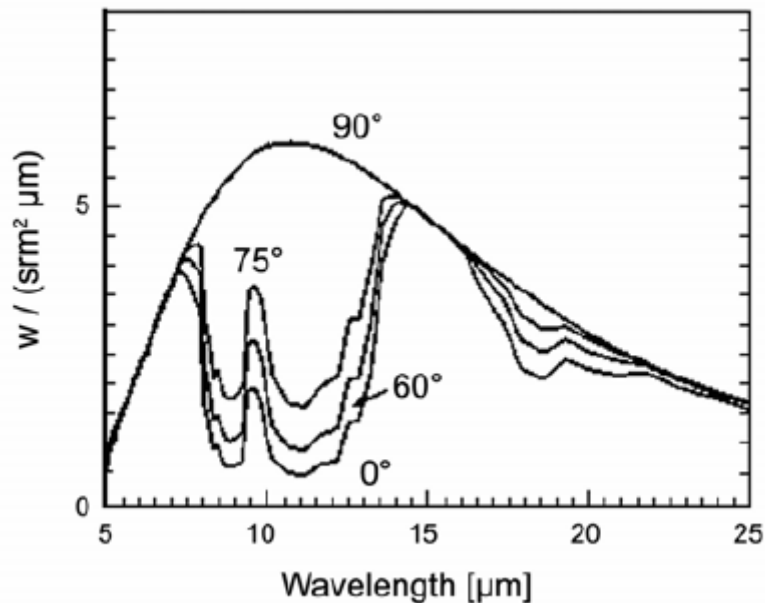


Figura 5.14. Ventana atmosférica principal en el intervalo de 8 a 14 micrómetros de longitud de onda. Fuente: Kipp & Zonen, 2001.

Dentro de este rango espectral la Tierra es capaz de mantener una temperatura de equilibrio mediante la emisión de una cierta cantidad de calor absorbida cada día principalmente a causa de la radiación solar incidente.

El Sol se puede considerar en una buena aproximación como un cuerpo negro a una temperatura equivalente de aproximadamente 5770 K. El 99% de la energía que emite en forma de fotones se encuentra en longitudes de onda inferiores a 4 micrómetros y que se denomina radiación de onda corta. Por otra parte, si también se aproxima la superficie de la Tierra como un cuerpo negro, ésta radiaría con una temperatura equivalente cercana a 285 K. (Kipp and Zonen, 2001) Más del 99% de la energía radiada a esta temperatura se emite a longitudes de onda superiores a 3 micrómetros y se denomina radiación de onda larga, térmica o infrarroja.

El flujo de radiación de onda larga incidente sobre la superficie de la Tierra es el resultado de la reemisión por parte de la atmósfera de la radiación de onda larga previamente emitida por la Tierra. La reemisión es el efecto reversible que presentan algunas moléculas constituyentes de la atmósfera como el agua (H_2O), el oxígeno (O_2), el ozono (O_3) o el dióxido de carbono (CO_2).

Evaluación energética experimental de edificios en condiciones reales de uso mediante el ajuste de modelos de simulación con aplicaciones al control predictivo

entre otros. La radiación que no es absorbida por estos componentes de la atmósfera la abandona hacia el espacio exterior. Este es el motivo por el que un objeto se puede enfriar por debajo de la temperatura del aire de noche y con cielos despejados.

El instrumento empleado para la medida de la radiación de onda larga incidente sobre una superficie se denomina pirgeómetro. Un pirgeómetro consiste en una termopila (compuesta de termopares) que mide la radiación incidente sobre un elemento absorbente situado detrás de una ventana de silicio con un recubrimiento selectivo que limita las longitudes de onda de la radiación incidentes sobre él y, por otra parte, le protege de los agentes meteorológicos. También dispone de un sensor de temperatura (habitualmente una Pt-100) instalada en el borde del absorbedor, junto a las uniones más frías. El esquema de un pirgeómetro se puede ver en la figura 5.15., donde se identifica cada una de sus partes.

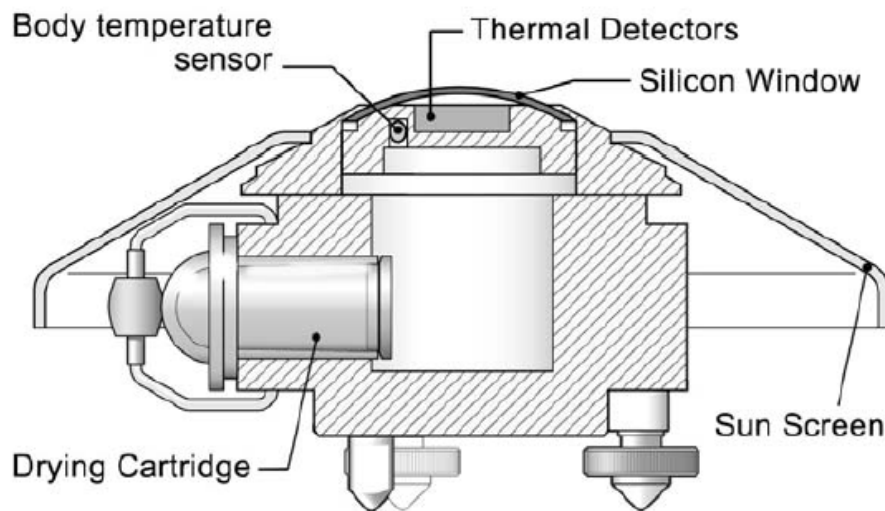


Figura 5.15. Esquema de un pirgeómetro como el instalado en el mástil del C-Ddl. Fuente: Kipp & Zonen, 2001.

La ventana de silicio del dispositivo escogido es transmisiva en el entorno comprendido entre 4.5 y 40 micrómetros (ver figura 5.16). Al límite inferior de la ventana de transmisión se le denomina longitud de onda umbral (cut-on wavelength). Es común encontrar otros dispositivos con longitudes de onda umbrales inferiores. Con ese tipo de dispositivos se ha de tener precaución en la medida, pues en el caso de días soleados y claros con baja humedad en el intervalo comprendido entre 2.5 y 4.5 micrómetros puede haber una cantidad de radiación solar infrarroja en el entorno de 10 W/m^2 .

La radiación incidente de onda larga, L_d , se puede calcular gracias a la medida del potencial eléctrico en la termopila, U_{emf} , y la temperatura del cuerpo del pirgeómetro, T_b , mediante la relación:

$$L_d = \frac{U_{emf}}{S} + \sigma T_b^4, (ec. 5.12)$$

Donde S es un factor de calibración propio del aparato y σ la constante de Stefan-Boltzmann. Es importante destacar en este punto que la temperatura aparente de la bóveda celeste no es posible obtenerla únicamente mediante un único pirgeómetro, pues solamente se dispone del balance entre lo que éste emite y lo que recibe de la bóveda, desconociendo la fracción original que había emitido la superficie de la Tierra. Para obtener semejante medida se habría de colocar otro pirgeómetro orientado hacia el terreno (dispositivo conjunto conocido como pirgeómetro neto).

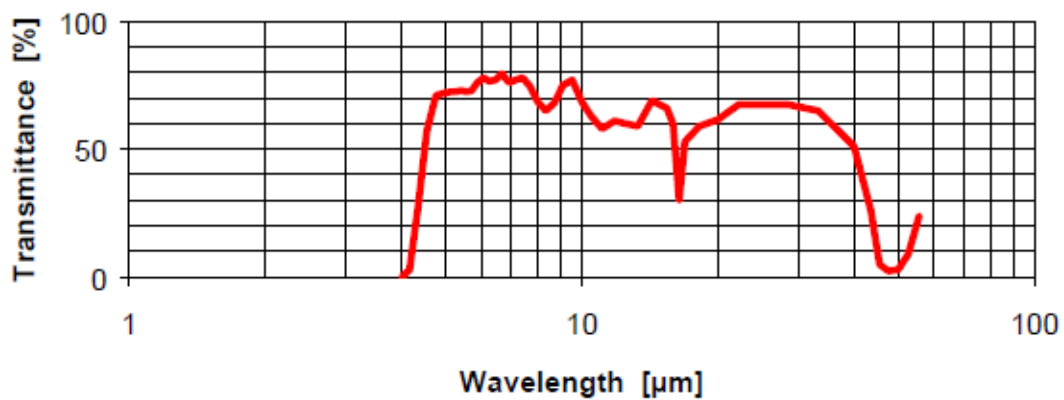


Figura 5.16. Transmitancia en incidencia normal de la ventana de silicio del pirgeómetro CG4.

Fuente: Kipp and Zonnen, 2001.

Lo que sí es posible obtener con una única medida es el factor de cobertura celeste, ya que en un día típicamente nublado el 100% de la radiación de onda larga emitida por la Tierra es absorbida y reemitida de nuevo. En ese caso el término de intercambio radiativo neto entre el pirgeómetro y la bóveda celeste (U_{emf}/S) será cercano a cero. Por el contrario, en el caso de cielos despejados será máximo. Según las especificaciones del fabricante, se puede considerar un cielo cubierto para valores del flujo neto inferiores a 5 W/m^2 y despejado para valores superiores a 90 W/m^2 . En el caso de pirgeómetros con ventanas que presenten umbrales de la longitud de onda que sean inferiores a 4.5 micrómetros las medidas en días claros y soleados deben corregirse por el efecto de la cantidad de radiación solar infrarroja. En el caso del dispositivo empleado se espera que dicho efecto no supere los 3 W/m^2 , por lo que las medidas durante días soleados se pueden considerar igual de válidas.

En la figura 5.17. se presenta un diagrama de dispersión de la cobertura nublada obtenida mediante las medidas del pirgeómetro y las estimadas teóricamente según Kasten (Kasten, 1980) a partir de las medidas de piranómetro, para la serie temporal que comprende el periodo desde agosto de 2009 hasta diciembre del mismo año. En dicho diagrama se observa que no hay una relación clara.

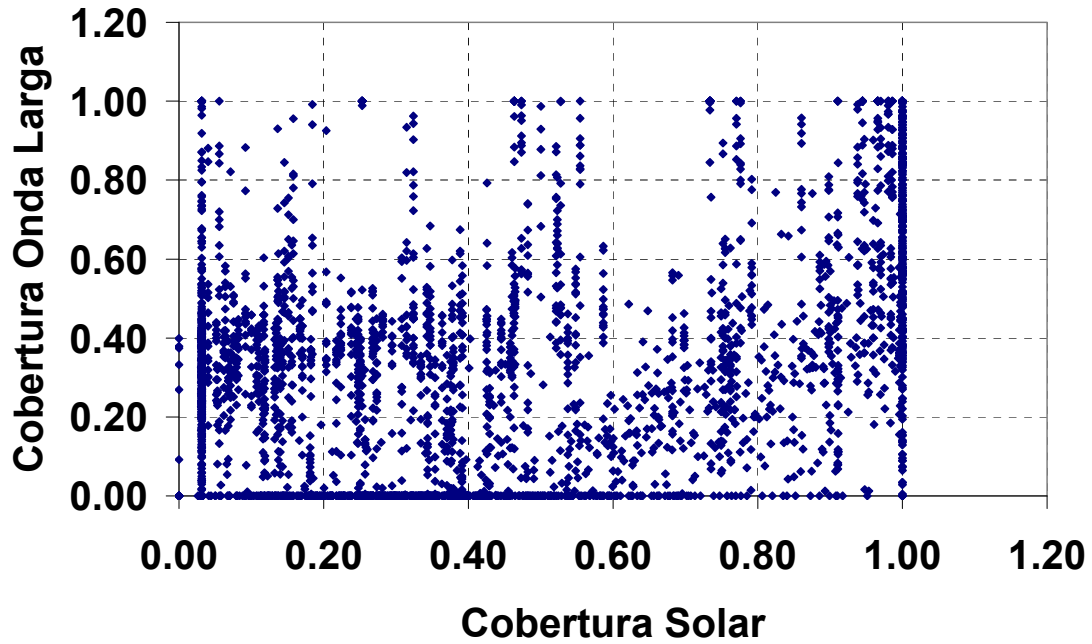


Figura 5.17. Cobertura del cielo medida en onda larga frente a la media en onda corta.

No obstante, en el algoritmo de Kasten para los valores nocturnos la medida del factor de cobertura se interpola, por lo que pudiera pensarse que el diagrama anterior queda falseado por dicho efecto, en la figura 5.18 se presenta el mismo diagrama, filtrado para valores de la irradiancia solar global sobre la horizontal superiores a 20 W/m^2 . Se puede observar que la mayoría de los puntos no presentan una correlación aparente.

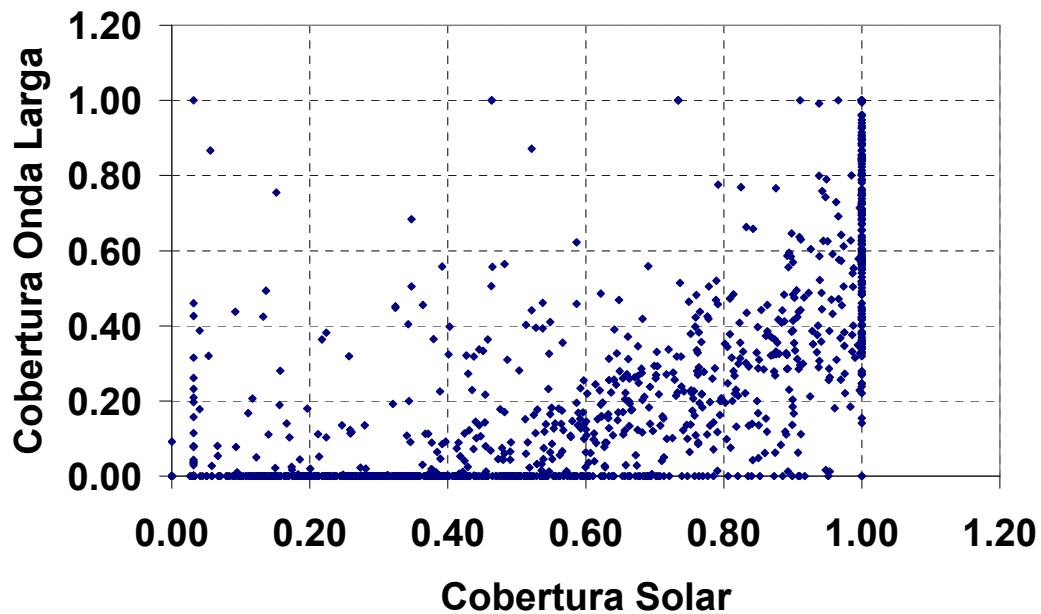


Figura 5.18. Cobertura del cielo medida en onda larga frente a la media en onda corta (solar) durante el día.

Así, de lo expuesto se puede deducir que **el factor de cobertura de la bóveda celeste obtenido a partir de medidas de radiación en onda corta y en onda larga difiere**. Dada la importancia de este factor sobre el cálculo de la temperatura efectiva de la bóveda celeste, **resulta importante la medida experimental de este factor en la evaluación energética experimental, realizada con un pirgeómetro de longitud de onda umbral lo suficientemente elevada como para poder despreciar el efecto de la irradiancia solar durante el día**.

En los análisis subsiguientes se empleará este factor de cobertura obtenido experimentalmente.

5.1.4. AJUSTE Y DIAGNÓSTICO MEDIANTE ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS LIBRES

El ajuste de un modelo con datos experimentales implica tres pasos diferentes: La definición de un objetivo, la definición de las ligaduras presentes en el ajuste y, finalmente, la selección de un algoritmo de optimización apropiado para el caso que ocupa. A continuación se aborda cada uno de estos aspectos y, finalmente, la aplicación del método al ajuste para el despacho 13.

5.1.4.1. DEFINICIÓN DE UNA FUNCIÓN OBJETIVO.

Esto se puede implementar de numerosas maneras. Una de las formas más simples consiste en la definición de una función escalar de la serie de residuos (por ejemplo, la varianza) para ser minimizada. En el caso que nos ocupa disponemos de una serie de medidas diferentes, lo que puede hacer que el problema se vuelva multiobjetivo. Una de las técnicas apropiadas cuando se tienen optimizaciones multiobjetivo consiste en la caracterización del denominado frente de Pareto del sistema. El frente de Pareto de un sistema se define como el conjunto de soluciones no dominadas del mismo, entendiendo por solución no dominada aquella para la que no existe otra solución que sea mejor en todas sus características o componentes.

En el caso que nos ocupa, el frente de Pareto para la caracterización de la optimización del sistema consistiría en una variedad pentadimensional que, aunque la literatura informa sobre progresos al respecto (Blasco, 2008), en el caso de frentes de Pareto no convexos la complejidad puede aumentar notablemente (Berezkin, 2006). Otros autores muestran cómo la computación evolutiva puede ayudar en la solución de problemas multiobjetivo (Coello, 2004). Aunque se trata de una vía prometedora, en nuestro caso se emplea una función escalar que consiste en la suma ponderada de los valores absolutos de las medidas y las varianzas de la serie de residuos, con los factores asociados a la temperatura del aire interior de las estancias seleccionadas cincuenta veces más influyentes. De ese modo, se evita la caracterización del frente de Pareto y se otorga más peso a la temperatura del aire interior, variable que tiene una mayor influencia no sólo sobre la dinámica del sistema, sino sobre el confort térmico en el interior. La influencia relativa de la temperatura del aire interior sobre el confort térmico es un

aspecto ampliamente estudiado y, de hecho, ya ha sido aplicado en modernos algoritmos de control que reclaman una superior eficiencia energética (Castilla, 2010).

5.1.4.2. DEFINICIÓN DE LIGADURAS SOBRE EL SISTEMA

En el caso que nos ocupa, las ligaduras consisten en el rango de validez física de los parámetros estimados. Si la estimación de los parámetros libres proporciona valores que se alejan de la validez física, el modelo debe ser revisado para que el ajuste se realice con garantías suficientes.

5.1.4.3. SELECCIÓN DEL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN: EVOLUCIÓN DIFERENCIAL

La cuestión relativa a la optimización es una mezcla de heurística y de rigor, de teoría y de experimentación. Se puede enfocar desde un punto de vista estrictamente matemático aunque tiene aplicaciones en prácticamente cualquier rama de la ciencia y de la tecnología. El hecho de listar la impresionante cantidad de métodos y algoritmos propuestos en el pasado es un trabajo que se encuentra fuera de los límites de esta investigación. En el seno de la estimación de parámetros de modelos teóricos a través de datos experimentales se trata de un problema particularmente difícil por dos motivos:

Los datos experimentales llevan asociada una incertidumbre, aunque sólo sea por el hecho de que los instrumentos de medida tienen una precisión finita. Cualquier método de optimización que asuma datos experimentales exentos de error, como los basados en la minimización de una función escalar de los residuos, pueden derivar en modelos ajustados que representen no sólo el comportamiento dinámico del sistema, sino también del ruido asociado a los datos experimentales.

La estimación de un modelo teórico requiere encontrar una solución óptima global en lugar de una local. La posibilidad de encontrar mínimos locales ha sido objeto de estudio en el pasado, y aún así sigue presentando tremendas dificultades. Históricamente, los métodos para clasificar problemas globales de optimización se han clasificado como estocásticos o deterministas. Los métodos estocásticos evalúan la función objetivo en puntos distribuidos pseudoaleatoriamente de la región de variación permisible del espacio de parámetros. Estos últimos destacan por su rapidez a la hora de enfrentarlos a optimizaciones que implican una elevada potencia de cálculo.

En estudios pasados (Palomo, 2002) se proponen varias alternativas como algoritmo de optimización, destacando Gauss-Newton, métodos de Montecarlo y un algoritmo basado en la búsqueda heurística. Siguiendo experiencias pasadas del autor (Enriquez, 2009) se ha implementado un algoritmo metaheurístico basado en la computación evolutiva: Evolución Diferencial.

Desde su primera aparición en 1952 las metaheurísticas han sufrido un enorme desarrollo. En 1965 Recherberg concibe el primer algoritmo que emplea estrategias evolutivas, en 1970 Hastings concibe el algoritmo de Metropolis-Hastings que es capaz de muestrear cualquier

función de densidad de probabilidad, en 1975 Holland acuña el término algoritmo genético y cinco años más tarde Smith describe la programación genética. En 1983 se desarrolla el popular algoritmo simulated annealing, y cinco años más tarde se celebra la primera conferencia sobre algoritmos genéticos en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Ya en 1991 el algoritmo de colonias de hormigas es propuesto por Marco Dorigo en su tesis y en 1993 el MIT comienza a publicar la revista Evolutionary Computation. En 1995 Kennedy y Eberhart desarrollan Particle Swarm Optimization y sólo dos años más tarde Storn y Price proponen al algoritmo de evolución diferencial.

Los algoritmos evolutivos son algoritmos de optimización que usan la búsqueda y el aprendizaje, inspirándose en los procesos de evolución natural y evolución genética. Es habitual codificar un determinado problema de optimización como una serie de individuos (cada uno de ellos una solución al problema, por ejemplo, un conjunto de parámetros del modelo), una regla de selección, una regla de reproducción y otra de reemplazo. El algoritmo se ejecuta hasta que se verifica una condición de parada. En la figura 5.19 se muestra el pseudocódigo para un Algoritmo Evolutivo.

```
t ← 0
inicializar la población P → P(t)
evaluar P(t)
repeat
    t ← t + 1
    seleccionar P(t) desde P(t-1)
    recombinar P(t)
    mutar P(t)
    evaluar P(t)
until se cumple la condición de terminación
```

Figura 5.19. Pseudocódigo de un algoritmo genético.

Evolución Diferencial es un tipo de algoritmo evolutivo que implementa el mecanismo que se describe en las siguientes líneas. Mediante la mutación diferencial se añade la diferencia proporcional de dos individuos (v_2, v_3) elegidos aleatoriamente de la población a un tercer individuo (v_1 , *individuo objetivo*) también elegido aleatoriamente. El nuevo individuo se llama *individuo mutado* o *vector mutado*:

$$W_i = v_1 + \mu(v_2 - v_3), (\text{ec. 5.13})$$

La constante de mutación $\mu > 0$ establece el rango de diferenciación entre los individuos v_2 y v_3 con el objetivo de evitar el estancamiento en el proceso de búsqueda. Tras la mutación, se realiza una operación recombinación sobre cada individuo v_i (*objetivo*) para generar un individuo intermedio u_i (*candidato*).

El individuo intermedio u_i es construido mezclando las componentes de w_i y v_i , bajo una probabilidad predefinida, Cr. Finalmente el operador de selección decide en base a la mejora de la función objetivo, si el individuo intermedio u_i es aceptado y reemplaza al individuo objetivo v_i ; o si por el contrario, el individuo intermedio es rechazado y se conserva el individuo objetivo en la siguiente generación.

En este trabajo se ha implementado Evolución Diferencial con un código que se ha sido desarrollado expresamente en Matlab. Dicho código emplea los parámetros del modelo como genes y se han tomado probabilidades de mutación y de generación de individuo intermedio iguales a 0.5, valores habituales en la literatura (Storm, 1997; Price, 2005). Se ha partido de una población de 20 individuos en los ajustes y como condición de parada se ha establecido una tolerancia relativa en la evolución poblacional igual a 0.001 con un buffer de espera de veinte generaciones.

5.1.4.4. DIAGNÓSTICO DEL MODELO ORIGINAL

Con las variables exógenas caracterizadas anteriormente y con el algoritmo de optimización descrito, se procede al ajuste de los parámetros libres del modelo original. En la figura 5.20 se muestra la evolución temporal de la estimación de la simulación frente a la medida experimental de la temperatura del aire interior del despacho 13 durante la evolución libre de 2009. La estimación se acerca mucho más a los valores medidos que en el caso de los parámetros originales. No obstante, los residuos (figura 5.21) muestran que la estimación se encuentra fuera de la incertidumbre experimental al menos en el 50% de los casos.

En la tabla 5.4 se muestran los valores de los parámetros ajustados según el modelo original frente a los valores nominales empleados en la estimación “a priori” del comportamiento del C-Ddl. Se puede observar la gran divergencia en la mayoría de los parámetros, alcanzando valores fuera del rango de validez física, como en el caso del coeficiente de absorción del cerramiento, que supera la unidad. **Dado que los parámetros se encuentran fuera del rango de aceptabilidad física, el modelo original debe ser descartado como predictor de la evolución temporal de la temperatura del aire interior del C-Ddl en el caso más sencillo: evolución libre.**

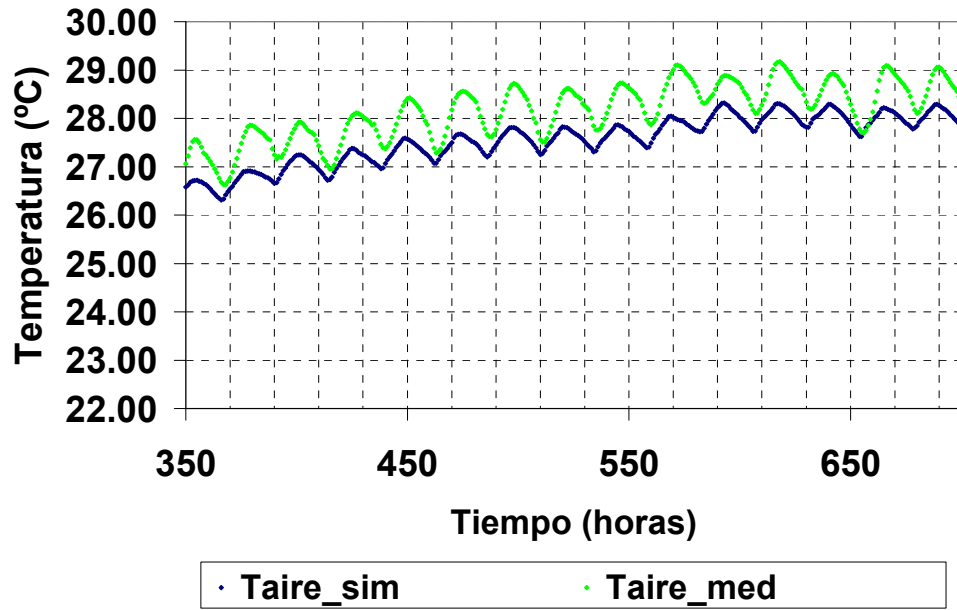


Figura 5.20. Temperatura del aire interior medida y simulada con el modelo original y sus parámetros libres ajustados en la evolución libre del despacho 13.

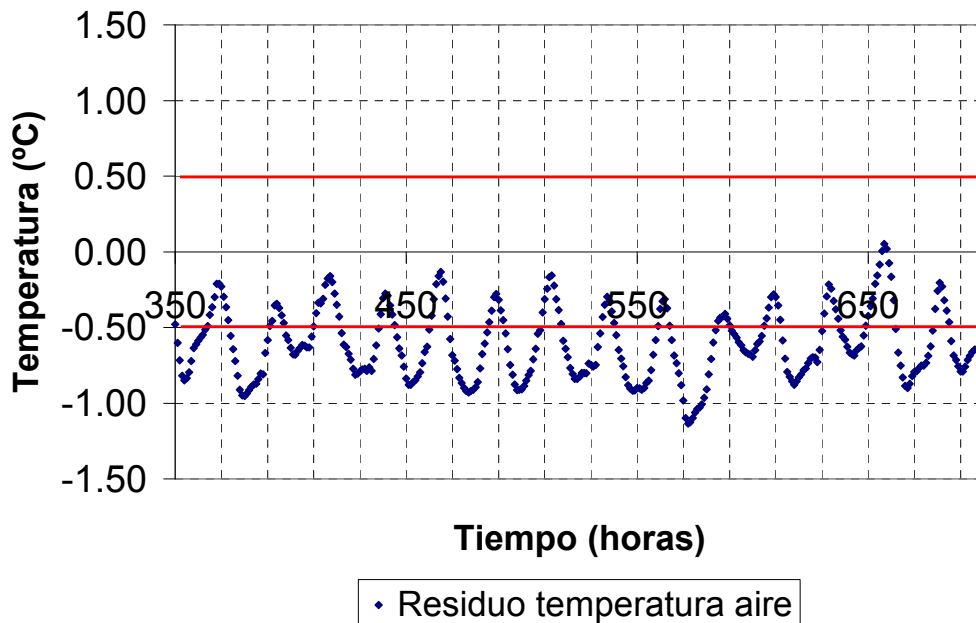


Figura 5.21. Residuos en la temperatura del aire interior del despacho 13 para la evolución libre del modelo original ajustado.

Parámetro	Valor nominal	Ajuste modelo básico
Poliuretano proyectado conductividad (kJ/hmK)	0.144	0.083
Convección exterior (kJ/hm ² K)	4.000	0.198
Absortividad exterior	0.400	1.204
Hormigón suelo conductividad (kJ/hmK)	8.280	0.548
Mortero monocapa capacidad (kJ/hkgK)	1.100	0.074
Poliestireno espesor (m)	0.040	0.069
Convección exterior (kJ/hm ² K)	3.000	14.648
Absortividad exterior	0.700	0.974
Infiltración (1/h)	0.600	0.154

Tabla 5.4. Valores de los parámetros ajustados en evolución libre frente a los valores nominales empleados en la estimación a priori del comportamiento del C-DdI.

No obstante, una interpretación adecuada de las consecuencias físicas de los valores estimados por el modelo, incluso cuando no son válidos, puede permitir identificar las deficiencias y, consiguientemente, su mejora. Con respecto al cerramiento exterior se observa una disminución de la resistencia térmica del mismo, indicado por la drástica reducción tanto de la conductividad térmica de la capa de poliuretano como del coeficiente de convección exterior. Por otra parte, el coeficiente de absorción aumenta notablemente, lo que indica que la influencia de la irradiancia solar se encuentra infraestimada y que el intercambio con la temperatura exterior sobreestimado por el modelo. Por otra parte, la disminución de la capacidad calorífica de la cubierta (disminución de la capacidad calorífica del mortero monocapa) y el aumento del coeficiente de absorción indican un déficit de irradiancia, probablemente asociado a una temperatura de la cubierta infraestimada.

Así, a partir de las consecuencias físicas extraídas de los parámetros estimados del modelo se puede concluir que existe una deficiencia de irradiancia solar, que es consistente con el aumento de aislamiento con respecto al efecto de la temperatura exterior. La causa más probable de este efecto es que el efecto de la sombra arrojada sobre la cubierta ha sido infraestimado.

En la siguiente sección se modifica el modelo y se estima nuevamente.

5.1.4.5. NUEVO MODELO A PARTIR DEL DIAGNÓSTICO

Como se ha demostrado en la sección anterior, el efecto de la sombra sobre la cubierta probablemente ha sido sobreestimado. Por ello, se modifica el modelo evitando la sombra arrojada sobre la cubierta, permitiendo que tanto la irradiancia solar directa como la difusa sobre la horizontal incidan plenamente sobre ella y se estiman de nuevo los parámetros. En la figura 5.22 se muestra la temperatura del aire interior del despacho 13 durante el periodo de evolución libre, tanto medida como simulada con los parámetros estimados. Asimismo, en la figura 5.23 se presentan los residuos para la temperatura del aire interior durante el mismo periodo.

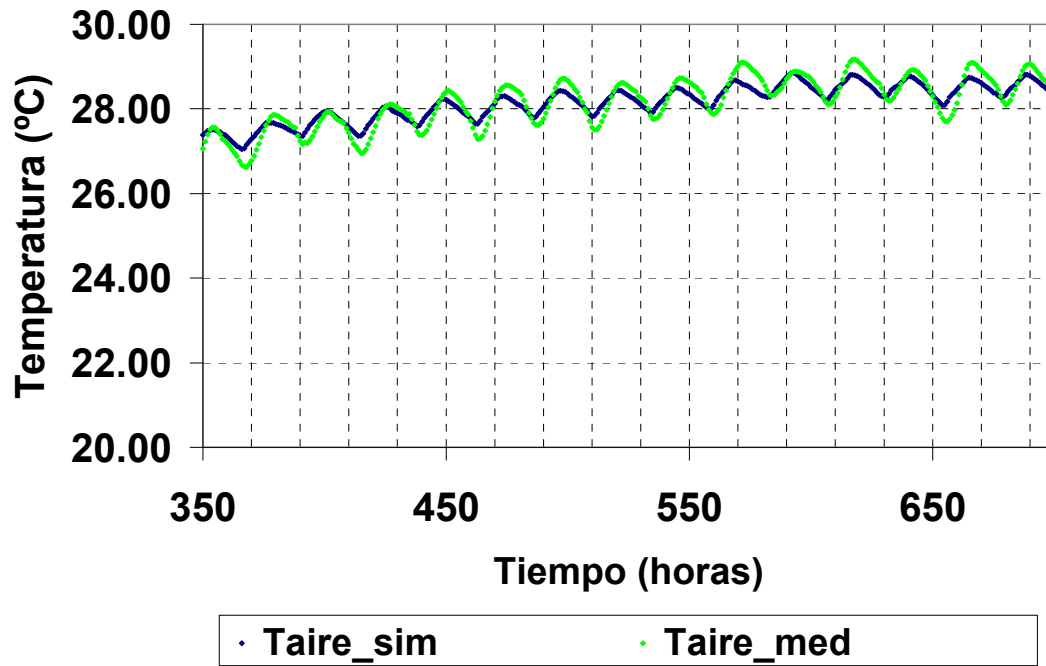


Figura 5.22. Temperaturas del aire interior del despacho 13, medidas experimentalmente y simuladas mediante el modelo ajustado, durante el periodo de evolución libre.

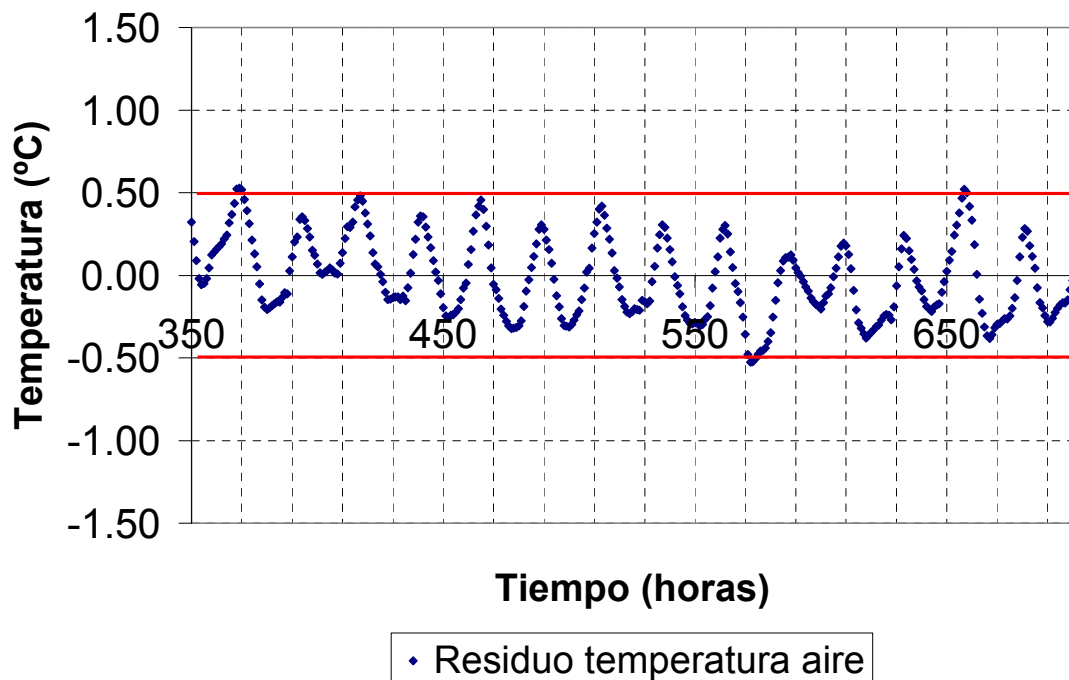


Figura 5.23. Residuos para las temperaturas del aire interior del despacho 13, durante el periodo de evolución libre.

Se puede observar que **la evolución temporal de la temperatura del aire ahora es mucho más preciso y, observando los residuos que éstos caen dentro de la franja de incertidumbre calculada para los sensores de 0.5 °C, por lo que con respecto a la**

evolución temporal de la temperatura del aire, el nuevo modelo se puede considerar ajustado. No obstante, el modelo debe representar adecuadamente la realidad, por lo que hay que inspeccionar cada una de las nuevas hipótesis introducidas en el modelo. En primer lugar, se ha introducido la hipótesis de sombreado deficiente de la cubierta. En el caso de este C-Ddl la comprobación es relativamente sencilla, basta con la inspección visual. En la figura 5.24 se presenta una fotografía de la cubierta del C-Ddl tomada al mediodía solar a finales de abril. Se puede observar la incidencia de la radiación solar directa sobre la cubierta, salvo por una pequeña franja de sombra, que representa un mínima fracción de la superficie.



Figura 5.24. Fotografía de la cubierta del C-Ddl tomada al mediodía solar a finales de abril. Se observa cómo la radiación solar incide directamente sobre ella, en contra de lo especificado en las condiciones de diseño.

Así, **el método teórico-experimental empleado ha desechado el modelo original y, mediante la interpretación física de los parámetros ha sugerido una mejora al modelo que, en principio, resulta manifiestamente exitosa.** Aunque una simple estimación visual de este hecho posiblemente hubiera bastado a un modelizador para notar ese efecto, debe verse como una fortaleza del método empleado, lo que aumenta la confianza en que otros efectos más sutiles puedan ser también diagnosticados empleando la misma técnica.

Aunque el resultado anterior despierta cierto optimismo la estimación de los parámetros debe ofrecer valores dentro del rango de validez física. En la tabla 5.5 se muestran los resultados de las estimaciones para el nuevo modelo, junto con los anteriores.

Parámetro	Valor nominal	Ajuste modelo básico	Ajuste nuevo modelo (parámetros efectivos)
Poliuretano proyectado conductividad (kJ/hmK)	0.144	0.083	0.167
Convección exterior (kJ/hm ² K)	4.000	0.198	5.082
Absortividad exterior	0.400	1.204	0.401
Hormigón suelo conductividad (kJ/hmK)	8.280	0.548	6.508
Mortero monocapa capacidad (kJ/hkgK)	1.100	0.074	4.378
Poliestireno espesor (m)	0.040	0.069	0.052
Convección exterior (kJ/hm ² K)	3.000	14.648	0.831
Absortividad exterior	0.700	0.974	0.804
Infiltración (l/h)	0.600	0.154	0.131

Tabla 5.5. Valores de los parámetros ajustados en evolución libre para el modelo sin sombra frente a los valores nominales empleados en la estimación a priori del comportamiento del C-Ddl y los estimados para el modelo con sombra.

Los parámetros se encuentran ahora mucho más cerca de los valores nominales que en el caso del modelo con sombra, aunque siguen presentando discrepancias. La mayoría de las variaciones de los parámetros quedan dentro de un intervalo del 10 al 20 % de su valor nominal lo que, por otra parte, entraba dentro de las hipótesis realizadas para evaluar la incertidumbre en la respuesta del modelo asociada a variaciones en sus parámetros. Los casos que más se desvían son la conductividad térmica del mortero monocapa de la cubierta, que aumenta hasta cuatro veces su valor, así como el espesor de la capa de poliestireno y el coeficiente de convección exterior de la cubierta, que disminuye su valor en un orden de magnitud.

En este punto es conveniente destacar que estos parámetros son efectivos, esto es, se han escogido como representantes de un grupo por sus propiedades térmicas, bien referidas a la capacidad calorífica o a la conductividad térmica. Por ello, para diagnosticar la discrepancia se debe acudir a los parámetros globales de cada uno de los componentes constructivos: su resistencia térmica y su capacidad calorífica. De ese modo, se puede establecer el impacto relativo sobre el comportamiento energético del C-Ddl del cambio en el parámetro estimado.

Con respecto al cerramiento exterior, el coeficiente global de pérdidas una vez que se incluyen los valores de los parámetros relativos a todas las capas que lo constituyen asciende a 0.508 W/m²K, mientras que la estimación del mismo coeficiente con la conductividad térmica del poliuretano ajustada con el modelo es 0.544 W/m²K, lo que implica una **desviación a la alza en el coeficiente global de pérdidas inferior al 10%**. Bajo estas condiciones, se puede aceptar el valor del parámetro estimado.

Con respecto al suelo, el coeficiente global de pérdidas nominal es de 1.730 W/m²K, mientras que **el coeficiente global de pérdidas estimado presenta una desviación a la baja inferior al 10%**, concretamente 1.658 W/m²K. En este caso, también se puede aceptar el valor del parámetro estimado.

Con respecto a la cubierta se presenta un doble fenómeno: por un lado se aumenta la capacidad calorífica y por el otro se reduce la resistencia térmica. Este efecto se puede explicar si se tiene en cuenta la formación de la cubierta que es un forjado continuo con voladizo que ejerce las funciones de sombreamiento. De hecho, en el modelo original no se considera el voladizo al tener en cuenta la definición de la cubierta. Por ello, en el cálculo de la capacidad hay que tener en cuenta el material que éste incluye, pues transmite el calor por conducción al

resto de la cubierta. El cambio en la resistencia, por otra parte, indica que la relación resistencia/capacidad también cambia. Este hecho es claramente indicativo de que el régimen de conducción es bidimensional en lugar de unidimensional: **se identifica el forjado continuo con voladizo como un puente térmico de la construcción, que requiere de una modelización bidimensional de la conducción del calor.** No obstante, **el modelo ajustado mediante este método ofrece una solución unidimensional con parámetros ajustados equivalente y aproximada a la de un modelo bidimensional.** Finalmente, el coeficiente de absorción resulta más elevado que el nominal aunque, tras inspección visual de la cubierta y a tenor de los valores obtenidos para la reflectancia hemisférica del terreno mediante el albedómetro se puede considerar dentro del rango de validez. **Los valores obtenidos para la infiltración son notablemente inferiores a los nominales.** No obstante, este es uno de los parámetros que más incertidumbre presentan, por lo que a falta de medidas diferentes no se puede decir nada más que no viola ningún principio físico introducido en el modelo.

Así, se puede concluir que, con respecto a la evolución temporal de la temperatura del aire interior, el nuevo modelo representa de forma efectiva las características del sistema, con valores de los parámetros térmicos dentro de la incertidumbre esperada, sin violar ningún principio físico. El método identifica situaciones de conducción del calor bidimensional como el puente térmico producido por un forjado continuo con voladizo a modo de sombreamiento y ofrece una cuantificación de su efecto sobre un modelo unidimensional efectivo.

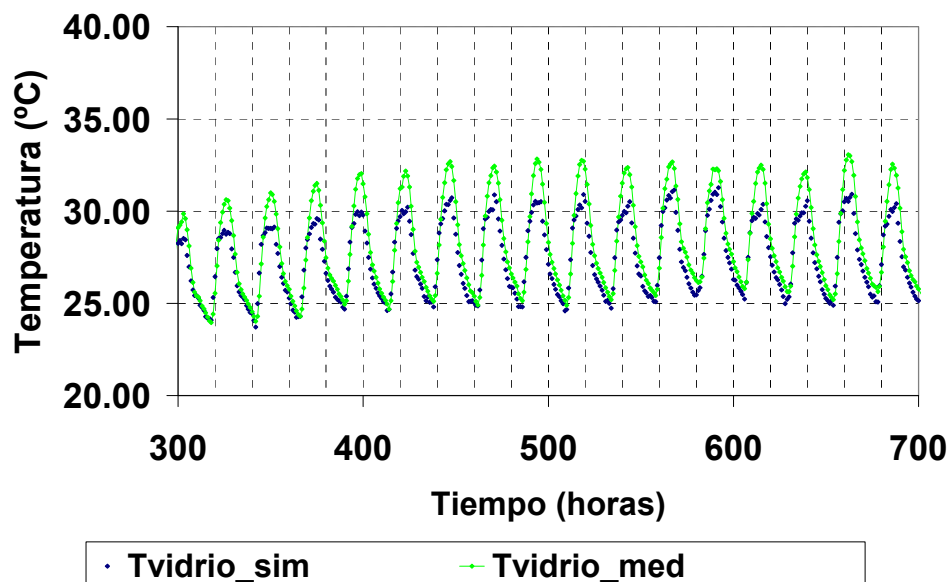


Figura 5.25. Temperaturas de la superficie interior del vidrio de despacho 13, medidas experimentalmente y simulada mediante el modelo ajustado, durante el periodo de evolución libre.

Por otra parte, también se dispone de otras dos variables de salida del modelo, que pueden ofrecer diagnósticos adicionales sobre el comportamiento térmico del C-DdI. En la figura 5.25.

se muestra la temperatura de la superficie interior del vidrio para el periodo en evolución libre, tanto la medida como la simulada con los parámetros ajustados del modelo.

Se puede observar que la temperatura de superficie durante la noche se encuentra dentro de los márgenes de error del equipo de medida, con diferencias inferiores a los 0.3 °C. Por el día no obstante, presentan desviaciones superiores, en el entorno a los 2 °C. Si la causa de la discrepancia fuese de origen convectivo debido, por ejemplo, a diferencias en la velocidad del viento, la discrepancia no presentaría una clara asimetría día-noche. La discrepancia debe ser, pues, de origen radiativo. Por otra parte, dado que sobre el sensor de temperatura no incide la radiación solar directa ni el entorno es altamente reflectante, se puede descartar como causa de la discrepancia los fenómenos radiativos de onda corta. Los fenómenos radiativos de onda larga susceptibles de mejora son el intercambio con el voladizo y con el terreno, respectivamente. No obstante, y para discriminar el efecto habría que introducir nuevas medidas que corroboraran el efecto y poder descartar efectos en el terreno.

Así, **aunque el modelo resulta conveniente para representar la evolución temporal de la temperatura del aire interior del despacho, presenta discrepancias en la predicción de la temperatura de la superficie del vidrio durante el día. Dichas discrepancias se identifican con intercambios de onda larga con los elementos sólidos circundantes como el voladizo y el terreno, sugiriendo nuevas fuentes de mejora futura del modelo de simulación en caso de requerirse.**

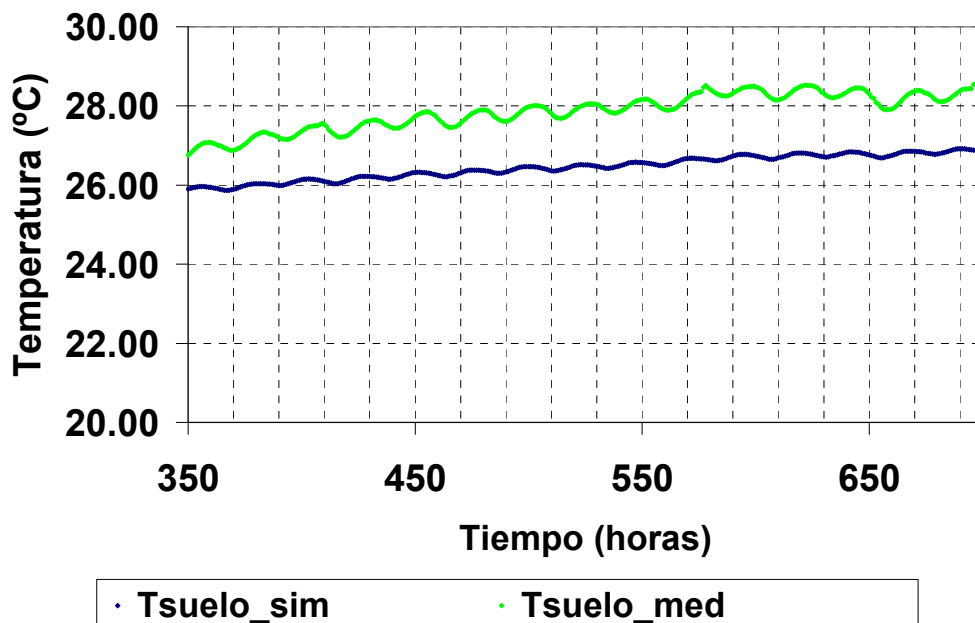


Figura 5.26. Temperatura de la superficie del suelo interior del despacho para el periodo en evolución libre, tanto la medida experimentalmente como la simulada con los parámetros ajustados del modelo.

Finalmente, la última de las salidas disponibles es la temperatura de la superficie del suelo interior del despacho. En la figura 5.26 se muestra la temperatura de la superficie del suelo

interior del despacho para el periodo en evolución libre, tanto la medida experimentalmente como la simulada con los parámetros ajustados del modelo.

En este caso se observa una discrepancia sistemática en la temperatura de la superficie del suelo interior del despacho medida frente a la predicha por el modelo. La diferencia en media es ligeramente superior al grado con muy ligera oscilación, del orden de 0.3 °C. Este hecho descarta el modelo como buen predictor de la temperatura de la superficie del suelo, aunque no lo invalida como predictor de la temperatura del aire interior. No obstante, hay que destacar en este punto que la incertidumbre de esta medida es muy superior, pues se encuentra en una zona particularmente expuesta y, además de la contaminación por fenómenos radiativos, puede que se encuentre ligeramente despegado, lo que hace que presente una temperatura más parecida a la del aire que a la de la superficie. De hecho, si se comprueban los datos medidos se observa que la diferencia entre la temperatura de la superficie del suelo y la del aire no difieren más de 0.8 °C.

Así, aunque el modelo resulta adecuado para representar la temperatura del aire interior del despacho, no resulta apropiado para representar la temperatura de la superficie del suelo. Dada la incertidumbre de la medida realizada y su parecido con la temperatura del aire interior no puede descartarse el método empleado como buena aproximación al problema.

Una vez que el modelo se puede considerar apropiado para describir el comportamiento térmico del C-Ddl durante un periodo de evolución libre, se puede proceder al estudio de su comportamiento ocupado y acondicionado. Este problema se aborda en la siguiente sección.

5.2. CARACTERIZACIÓN DE VARIABLES ENDÓGENAS. AJUSTE EN CONDICIONES REALES DE USO.

En la sección anterior se ha ajustado un nuevo modelo de forma exitosa durante el periodo de evolución libre de la temperatura del aire interior, lo que permite caracterizar la mayoría de los parámetros que gobiernan la respuesta pasiva del sistema a las excitaciones exteriores. No obstante, una edificación en condiciones reales de uso también se encuentra sometida a excitaciones de carácter interno, a caracterizar por una serie de variables endógenas.

En este sentido es conveniente destacar que la evaluación en condiciones reales de uso tiene una serie de limitaciones con respecto a los experimentos realizados en células de ensayo. Estas diferencias son principalmente dos: las condiciones de confort térmico interior previenen de la introducción de pulsos de energía para excitar el sistema y también previenen de la realización de experimentos que desacoplen ganancias internas en concepto de ocupación y modelización del sistema de climatización activa.

A continuación se detallan las aproximaciones realizadas para la modelización de las variables endógenas correspondientes al sistema de distribución de calor a través del suelo radiante, los intercambios de aire en el interior del C-Ddl y las ganancias de calor interna. A continuación, se consideran aspectos adicionales de la medida en el caso de las condiciones reales de uso

como es el de la temperatura de la superficie interior de los vidrios para, finalmente, ajustar el modelo del C-Ddl en condiciones reales de uso.

Como se mostrará más adelante, el modelo desarrollado y ajustado para las condiciones reales de uso presenta incertidumbres que impiden la modelización detallada de determinados fenómenos físicos. Sin embargo, dicho modelo se puede emplear como modelo efectivo para la temperatura interior, especialmente en aspectos relativos al control predictivo.

5.2.1. COMPONENTES ACTIVOS: DISTRIBUCIÓN DE CALOR A TRAVÉS DEL SUELO RADIANTE

El suelo radiante es un elemento de climatización activo que se encuentra íntimamente relacionado con los elementos pasivos, dado que se encuentra embebido en la propia construcción, modificando algunas de las hipótesis de cálculo introducidas para éstos. La introducción de un fluido caliente a través de las tuberías y el intercambio que éste presente con el terreno a través de los diferentes componentes es de esperar que sea multidimensional. Desde el punto de vista numérico, la conducción del calor multidimensional se aborda habitualmente a través de métodos de diferencias finitas o de elementos finitos. En esta aproximación, la región bajo estudio debe representarse mediante un mallado tridimensional. Para cada uno de los puntos de la malla y para cada instante de tiempo todas las variables físicas de interés deben calcularse en función del estado del sistema en los puntos vecinos del mallado. Este hecho hace que la potencia de cálculo requerida para la evaluación se multiplique varios órdenes de magnitud, resultando en muchos casos inabordable para los problemas prácticos. Por estos motivos, la comunidad científica relacionada con la simulación dinámica de edificios basada en el cálculo de funciones de transferencia para cerramientos ha desarrollado una vía alternativa de cálculo. Aquí se remarcarán solamente las características principales del método.

El método se basa en la evaluación del intercambio de calor entre el elemento activo y las diferentes estancias mediante una red térmica puramente resistiva, en la que para el cálculo de la resistencia térmica de cada elemento se emplea la solución de la ecuación del calor en estado estacionario para la configuración bajo estudio. La aplicación de esta técnica deriva el problema de transferencia de calor con la analogía eléctrica correspondiente a la conexión en triángulo de tres resistencias térmicas. Por conveniencia en el cálculo la topología triangular se convierte en una topología en estrella, a cambio de introducir una nueva variable de temperatura que represente la temperatura efectiva de la capa en la que se encuentra embebido el sistema activo. La resistencia térmica así calculada se demuestra que depende de dos variables geométricas: la distancia entre tuberías y su diámetro y de la conductividad térmica de la capa en la que se encuentran embebidas.

Por otra parte, para tener en cuenta la transferencia de calor entre el fluido y la tubería se modelizan tanto la convección como la conducción del calor como resistencias térmicas. La resistencia térmica por convección se modeliza mediante la solución cilíndrica con el

coeficiente de transferencia de calor derivado a partir de correlaciones para régimen turbulento. Para el caso de la resistencia térmica por conducción también se aplica la solución cilíndrica.

Finalmente, los anteriores análisis se aplican a la longitud de la tubería con el objetivo de calcular la transferencia de calor a lo largo de la misma, mediante integración y aplicación de un modelo de intercambio de calor entre la temperatura media del agua que circula por la tubería y la de la estancia a climatizar. Esta última parte consiste en una linealización del intercambio de calor que se encontrará lejos de la realidad para caudales bajos. Por ello, la aplicación de este método requiere que los caudales circulantes superen un determinado umbral que, en el caso que nos ocupa, es una condición que se cumple sobradamente. Este método de cálculo de la transferencia de calor entre las tuberías del sistema activo embebido y la estancia ha sido comprobado frente a soluciones detalladas calculadas por elementos finitos, mostrando un buen acuerdo entre ambos.

En el caso que nos ocupa, pues, **se emplea un modelo que implica un coeficiente de transferencia de calor efectivo que determina las características propias del sistema embebido. Dicho coeficiente de transferencia se introduce como un parámetro adicional a estimar.**

Desde el punto de vista de la monitorización se han introducido sensores de temperatura de inmersión en las tuberías de impulsión y de retorno, así como caudalímetros para conocer el caudal circulante por la tubería. Estos sensores, junto al estado de la válvula que controla el funcionamiento del sistema se introducen como datos experimentales de entrada en el modelo, quedando el coeficiente efectivo de transferencia de calor del sistema como una constante a identificar.

4.2.2. INTERCAMBIOS DE AIRE: CLIMATIZACIÓN A TRAVÉS DE INDUCTORES E INTERCAMBIOS CON OTROS RECINTOS.

Uno de los procesos físicos a los que es más sensible la temperatura del aire interior de una edificación se refiere a los intercambios de aire. Como ya se ha mencionado anteriormente éste es uno de los fenómenos más difíciles de incluir en los modelos dinámicos térmicos.

Además de un suelo radiante, el C-DdI dispone de un sistema de climatización por aire. Dado que se trata de un sistema de climatización de baja inercia se puede emplear para satisfacer la demanda en condiciones de confort a altas frecuencias. Este sistema se emplea para modular la temperatura en invierno, dada la elevada inercia del suelo radiante y para refrigerar en verano. Asimismo, el sistema de climatización por aire asegura el régimen de ventilación mínimo exigido por la normativa.

El sistema de climatización por aire consiste en dos etapas: una unidad de tratamiento de aire (UTA) y un inductor. La UTA preacondiciona el aire exterior y lo impulsa hacia cada uno de los despachos mediante una red de conductos, extrayéndolo mediante otra red de conductos de retorno. La red de conductos es completamente estática, sin compuertas accionables y la UTA dispone de un ventilador de frecuencia constante. Así, cuando funciona la UTA se puede considerar el aporte de aire a los recintos una constante a excepción de los momentos de

arranque y parada que se presenta un breve transitorio. Dada la frecuencia de análisis del C-Ddl dichos transitorios no se incluyen en el modelo. Por otra parte, para aumentar la eficiencia del sistema en su conjunto, la UTA no sólo incluye funciones de climatización del aire exterior, también de recuperación del calor del interior del C-Ddl y, cuando se considere lo suficientemente beneficioso, de la posibilidad de introducir aire sin tratar directamente desde el exterior (función de enfriamiento gratuito o *free-cooling*).

En cada uno de los despachos del C-Ddl existen unidades terminales denominadas inductores. La función de estas unidades consiste en modular, mediante un intercambiador de calor, la temperatura final de introducción del aire en el despacho para alcanzar las condiciones de confort decididas por cada usuario. Cada unidad mezcla el aire impulsado con la UTA y tratado con un intercambiador de calor con el propio aire del despacho, obteniéndose un aire de impulsión a una temperatura determinada. A la relación de mezcla de aire proveniente de la UTA y del propio despacho se le denomina *relación de inducción*. Los fabricantes de estos elementos aportan valores tabulados para la relación de inducción de cada aparato, obtenidos mediante ensayos de laboratorio. No obstante, la relación de inducción en condiciones reales de uso depende de numerosos factores, como son la temperatura de operación del sistema o la geometría concreta en la que ha sido instalado.

En el modelo se introduce este término como una masa de aire efectiva a una temperatura igual a la de impulsión del inductor, con dicha masa una constante a identificar y con la hipótesis de que la masa de aire entrante en la estancia es igual a la saliente. Desde el punto de vista de la temperatura del aire interior de la estancia este término es suficiente y permitiría estimar una demanda energética habida cuenta de que los coeficientes puedan ser ajustados con precisión. Bajo esa aproximación se toma el inductor como un elemento ajeno al comportamiento térmico de la estancia monitorizada. Otra posibilidad consiste en caracterizar el aire a la entrada del inductor, los aportes de energía en concepto de calor o de frío, y realizar un balance detallado. En esa aproximación el propio rendimiento del inductor forma parte del comportamiento térmico de la estancia.

En el primero de los casos basta conocer la temperatura de impulsión del aire a la salida del inductor, variable que se toma desde el sistema de control del C-Ddl. En el segundo caso, dado que funciona a dos tubos, se requiere conocer tanto el caudal como la temperatura de impulsión y de retorno del intercambiador de calor, así como la temperatura del aire de entrada al inductor. En el sistema de monitorización se han añadido un caudalímetro y sensores de temperatura de inmersión para caracterizar el intercambiador del inductor, mientras que la temperatura del aire de entrada al inductor se supone igual a la de impulsión de la UTA, que se toma desde el sistema de control. En esta aproximación se desprecian las pérdidas sufridas por el aire en el interior de los conductos y, dado que el despacho 13 se encuentra cerca de la UTA dicho término de pérdidas debería ser despreciable.

Además del sistema de climatización activo a través del sistema UTA-inductores existen otras posibilidades de intercambio de aire. Los intercambios de aire indeseados con el exterior a través del cerramiento ya han sido considerados con el término de infiltración. Para tener en

cuenta los intercambios de aire entre el corredor y las estancias se introduce en el modelo un término de intercambio de aire cuando la puerta se encuentra abierta. Dicho término se introduce como una masa de aire constante y a identificar que entra en la estancia con la temperatura del aire del corredor medida en las inmediaciones.

5.2.3. GANANCIAS INTERNAS DE CALOR.

Otro de los términos que hay que tener en cuenta en un edificio en condiciones reales de uso son las ganancias internas de calor. Estas ganancias internas provienen principalmente de tres contribuciones: iluminación, equipos eléctricos que disipan calor (ordenadores, impresoras, cafeteras, etc) y los propios ocupantes. Para las dos primeras se han dispuesto medidores de potencia activa en el sistema de monitorización, cuantificando el consumo eléctrico que producen los diferentes equipamientos. Cada uno de los equipos eléctricos disipa calor en el interior de la estancia mediante dos fenómenos: de convección y de radiación. Cada equipo concreto se puede modelizar mediante una transferencia de calor al entorno directamente proporcional a su consumo eléctrico, con un porcentaje determinado de disipación convectiva y otro de disipación radiativa. En el seno del modelo el porcentaje radiativo se aplica al nodo radiativo (esto es, sobre las superficies sólidas) y el porcentaje convectivo se aplica directamente sobre el aire interior. En la realidad el porcentaje de cada equipamiento depende de factores como la temperatura del aire, las características constructivas del aparato y la geometría relativa de su colocación. Semejante número de variables, en la práctica, es imposible de modelizar con el detalle suficiente. Por ello, se ha supuesto en el modelo que todo el consumo eléctrico de los aparatos se transforma en calor en el interior con una constante a identificar que determina el porcentaje convectivo de la contribución total de los aparatos.

En cuanto a las ganancias internas de calor en concepto de ocupación, como se ha mostrado en capítulos anteriores, éstas dependen de cada individuo concreto y, a su vez, del tipo de actividad que éste desarrolla. Esta medida es, con diferencia, de las más difíciles de realizar y de incluir en el modelo. Identificado el problema, en el seno del PSE-ARFRISOL se desarrolló un dispositivo que permitiera contar el número de ocupantes que entran o salen de una determinada estancia mediante la instalación de una barrera óptica y un software de proceso de las señales. En este trabajo no se introduce un modelo de ocupante, estudiando la desviación que se produce en los ajustes con respecto a la banda de incertidumbre. Para el resto de las medidas de ganancias internas se han introducido vatímetros para la medida de la potencia reactiva en los principales circuitos de la estancia.

5.2.4. AJUSTES DEL MODELO PARA CONDICIONES REALES DE USO: CONSIDERACIONES SOBRE LA MEDIDA DE LA TEMPERATURA DEL VIDRIO

Las medidas de temperatura de una superficie conllevan una incertidumbre experimental asociada mucho mayor que las de temperatura de un gas. Las medidas de temperatura de un gas (como el aire) deben asegurar un buen flujo del medio a medir y una protección contra la

irradiancia solar directa. Las medidas de temperatura de superficie deben asegurar, por otra parte, un perfecto contacto entre el elemento sensor y la superficie bajo estudio. Además, el intercambio de calor entre la superficie expuesta del elemento sensor, la superficie bajo estudio y el aire interior deben ser similares. En el caso de la temperatura de la superficie del vidrio en muchas ocasiones se encuentra bajo la incidencia de la radiación solar directa. Este hecho puede falsear la medida experimental, añadiendo un efecto no deseado y contaminando, por ello, la medida. El efecto de la colocación de un sombreamiento sobre el sensor también añade fenómenos de intercambio de calor radiativo entre superficies que modifican la medida experimental. Para cuantificar estos fenómenos y estudiar la posibilidad de modelizar el efecto de la irradiancia solar directa sobre el sensor se plantearon una serie de experimentos.

En primer lugar, y con el objetivo de maximizar el fenómeno se dispuso una chapa metálica en vertical y orientada hacia el sur y en cada una de sus caras uno de los sensores bajo estudio. Dicha chapa se colocó a la intemperie en las instalaciones del Laboratorio de ensayos Energéticos de Componentes de la Edificación (LECE), donde todas las variables meteorológicas de interés se encontraban registradas. La figura 5.27 muestra el dispositivo experimental implementado.



Figura 5.27. Vista Sur del dispositivo experimental de chapa opaca para comprobar la influencia de la incidencia de la radiación solar directa sobre la medida de la temperatura del sensor escogido para medir la temperatura de superficie de los vidrios del C-DdI. En la cara norte y enfrente se dispuso otro sensor de las mismas características.

Dada la elevada conductividad térmica y el bajo espesor de la placa, la temperatura en ambas caras se espera que sea idéntica, a falta de la diferencia en intercambios convectivos por cada cara. De ese modo, la diferencia de temperaturas entre ambos sensores permite obtener la influencia neta de la irradiancia solar. En la figura 5.28 se muestran las medidas de diferentes

componentes de la radiación solar para uno de los días de cielo claro durante la experimentación. Cerca del mediodía solar se alcanzan valores de irradiancia solar sobre la vertical que son cercanos a 800 W/m^2 , por lo que se puede considerar representativo del fenómeno bajo estudio.

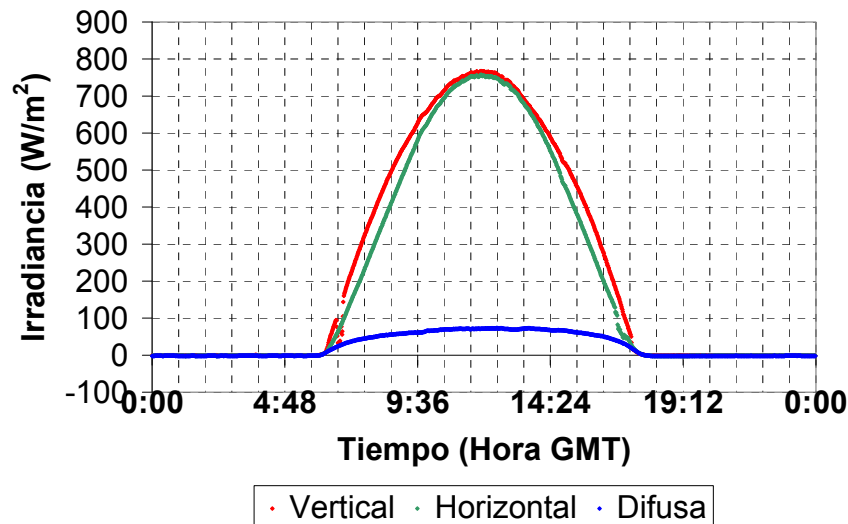


Figura 5.28. Valores de la irradiancia solar durante un día claro correspondientes al estudio bajo superficie opaca.

En la figura 5.29 se muestra la evolución de temperaturas a lo largo del mismo día, observándose un aumento de la temperatura de los sensores hasta los 50°C cerca del mediodía solar. Los sensores soleado y sombreado no muestran diferencias aparentes. Este hecho lo confirma la figura 5.30, que representa un diagrama de dispersión de ambas medidas con un índice de correlación cercano a la unidad.

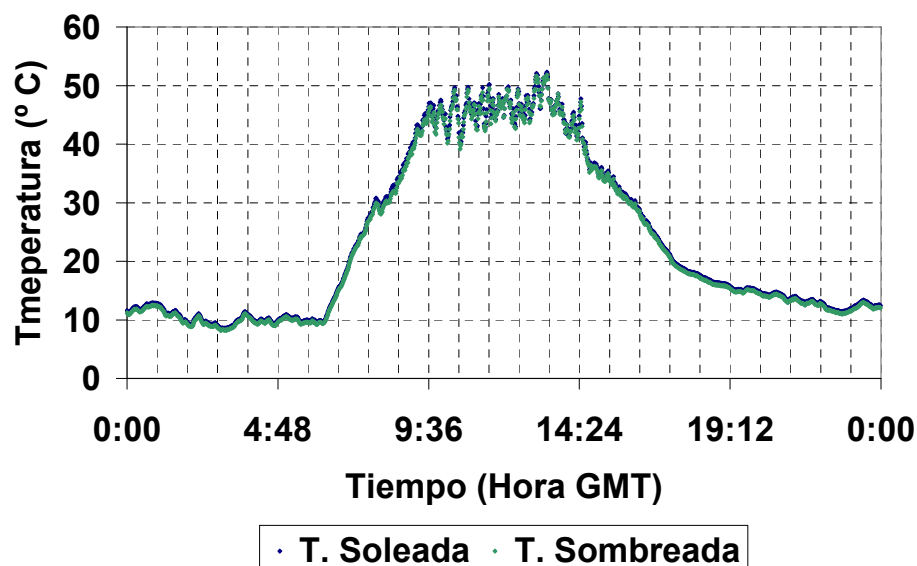


Figura 5.29. Evolución de las temperaturas a ambos lados de la placa metálica.

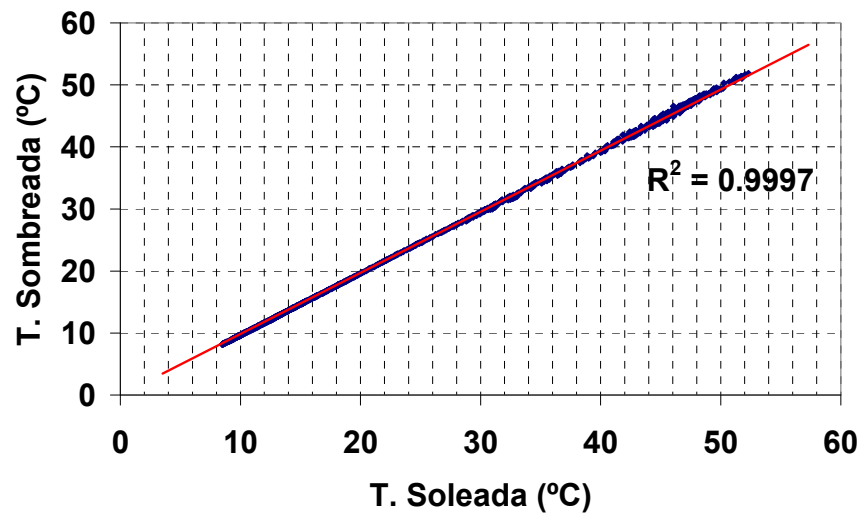


Figura 5.30. Diagrama de dispersión de las temperaturas sombreada y soleada para el experimento de la placa metálica.

De las medidas anteriores se puede concluir que **el sensor es inerte a la incidencia de la radiación solar directa cuando se coloca sobre un medio altamente conductor y de una absorptancia mayor que la del sensor.**

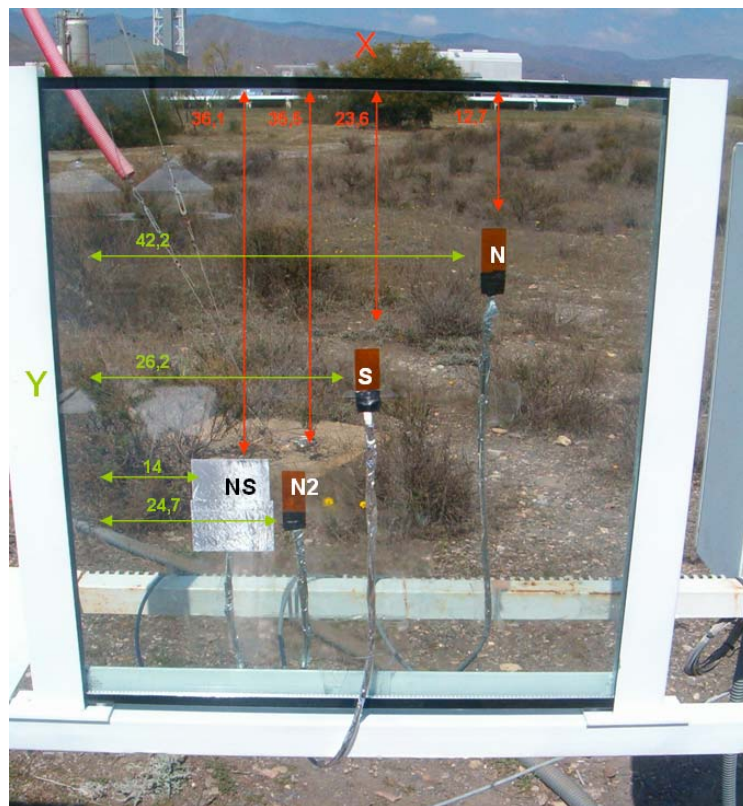


Figura 5.31. Instalación experimental para comprobar la influencia de la incidencia de la radiación solar directa sobre los sensores de temperatura de superficie instalados sobre un medio semitransparente.

Para evaluar el efecto del coeficiente de absorción del material sobre el que se instala el sensor se empleó una muestra del mismo vidrio instalado en el edificio para repetir el experimento. En ese caso se instalan cuatro sensores de temperatura de vidrio en la siguiente configuración: uno en el centro del vidrio expuesto a la cara sur y otros tres en la cara norte. Uno de ellos tras un sobreamiento que consiste en cinta adhesiva altamente reflectante y los otros dos lo suficientemente distantes entre sí para comprobar el posible gradiente térmico producido en el vidrio por el efecto del sobreamiento.

En la figura 5.31. se puede observar una fotografía del montaje experimental, sobre la que se indican las distancias relativas de cada uno de los elementos. Los cables se han protegido de la irradiancia solar con cinta reflectante, lo que supone una eliminación del efecto del calentamiento del cable por la irradiancia solar de 0'3 °C. Este hecho se ha comprobado experimentalmente al inicio de la instalación, colocando el último de los sensores sin protección contra la irradiancia y observando “in situ” la diferencia térmica antes de la instalación definitiva. En la figura 5.32 se muestran los datos experimentales obtenidos desde el principio de la campaña de medida y a lo largo de un mes de experimentación. Se puede observar una diferencia apreciable entre el sensor expuesto a la irradiancia y el sobreado. Asimismo, se puede observar que entre las señales N y N2 no hay diferencia significativa, lo que implica que el efecto del sobreamiento sobre el vidrio no se propaga hasta el otro sensor. Se puede observar también el deterioro en la señal, efecto de la intemperie sobre el sensor N, por lo que el resto de los análisis se realizan sobre el sensor N2.

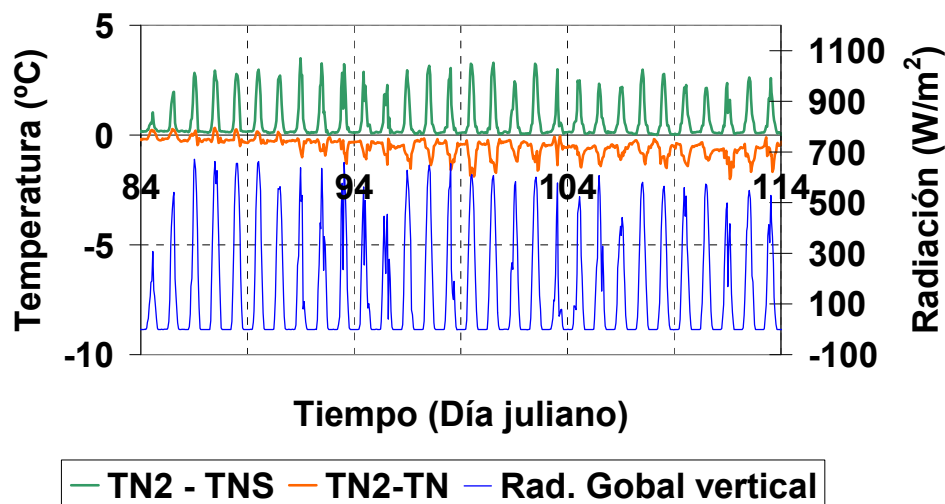


Figura 5.32. Señales obtenidas durante el primer mes de la campaña experimental. Se puede observar deterioro en los sensores debido al efecto de intemperie.

En la figura 5.33 se muestra la diferencia de temperaturas entre el sensor soleado y el sobreado en un día despejado, observándose el marcado efecto de la irradiancia solar.

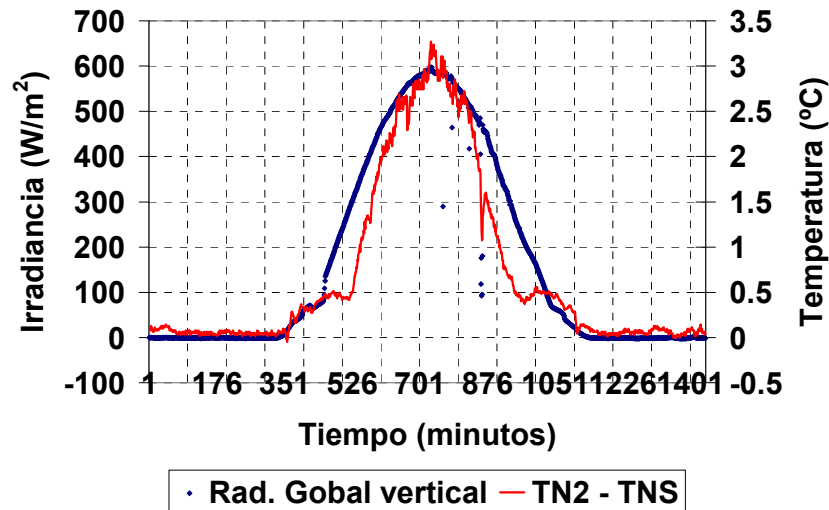


Figura 5.33. Diferencia de temperaturas entre el sensor soleado y el sombreado junto a la irradiancia solar sobre la vertical durante un día claro.

Por otra parte, como se puede observar en la figura 5.34., el efecto de la irradiancia solar directa sobre los sensores es inmediato. Viéndose una clara correlación entre la caída de la irradiancia solar y la influencia directa sobre la respuesta de los sensores.

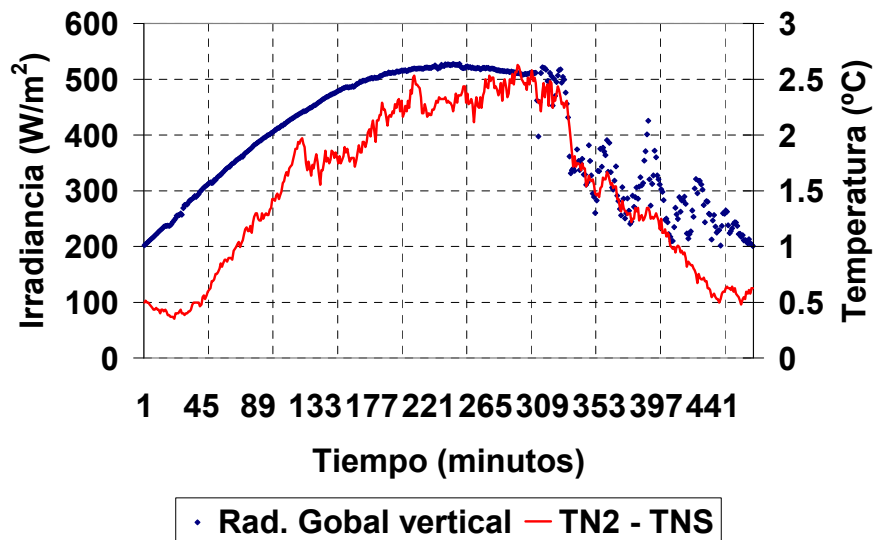


Figura 5.34. El efecto de la irradiancia solar sobre el sensor es inmediato. Véase la correlación entre la caída de la diferencia de temperaturas y el paso de una nube.

De este modo, **se demuestra que existe un efecto notable e inmediato de la incidencia de la irradiancia solar directa sobre la respuesta del sensor.** Para cuantificarlo, se realiza un ajuste de regresión de la diferencia de temperaturas entre el sensor soleado y el sensor sombreado con respecto a la radiación solar global vertical incidente. Dicho ajuste se realiza partiendo de un umbral mínimo de radiación solar vertical incidente y teniendo en cuenta solamente días claros. En la figura 5.35 se muestra uno de dichos ajustes, mostrándose una

clara correlación entre la radiación solar global incidente sobre la vertical y la diferencia de temperaturas registrada, por encima de los 300 W/m^2 , punto seleccionado para iniciar el ajuste.

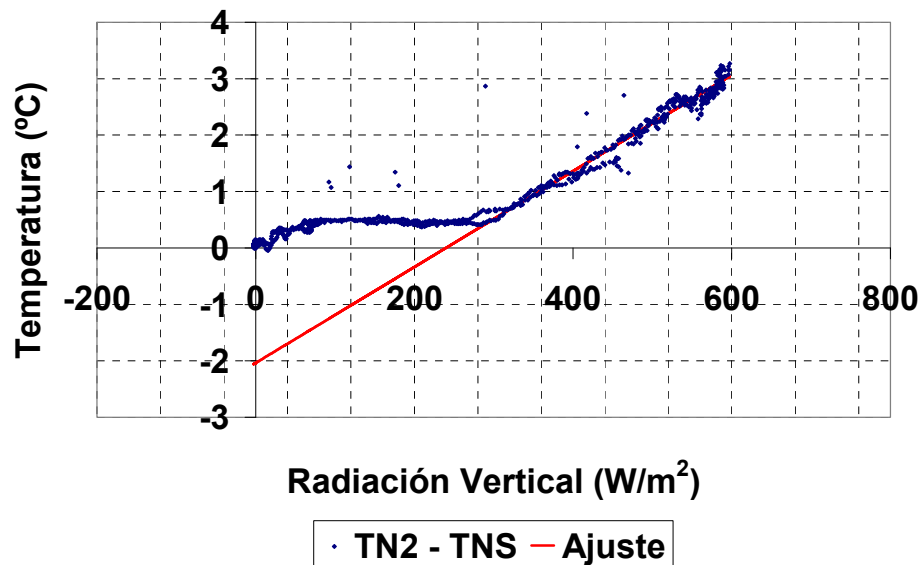


Figura 5.35. Se puede observar, en un día de cielo claro, una correlación clara a partir de un determinado umbral entre la incidencia de la irradiancia solar global sobre la vertical y la diferencia de temperaturas entre el sensor soleado y el sombreado.

En la tabla 5.6 se muestran diferentes ajustes para días despejados durante la campaña experimental. Los ajustes se realizan mediante un ajuste lineal a la relación $\Delta T = AG_v + B$, donde ΔT representa la diferencia de temperaturas entre el sensor soleado y el sombreado y G_v la radiación solar global incidente sobre la vertical. Los coeficientes de correlación mostrados muestran un magnífico acuerdo de la relación lineal expuesta y los coeficientes estimados muestran un alto grado de coherencia en los diferentes ajustes.

Día Juliano	A	B	R^2
83	0.0071	-1.8191	0.9771
99	0.0095	-2.5221	0.9444
100	0.0096	-2.5582	0.9594
107	0.0085	-2.0374	0.9657

Tabla 5.6. Coeficientes para los ajustes de regresión lineal de la diferencia de temperaturas observados entre los sensores soleado y sombreado y la incidencia de radiación solar global sobre la vertical en días despejados.

Es conveniente destacar en este punto que, debido a las características del vidrio, un ajuste predictivo del efecto de la irradiancia solar sobre la medida debería incluir efectos angulares. La figura 5.36 muestra semejantes efectos, representando la diferencia de temperaturas entre el sensor S y el NS frente a la diferencia de temperaturas entre el sensor N2 y el NS. Se puede observar que la relación en este caso no es lineal.

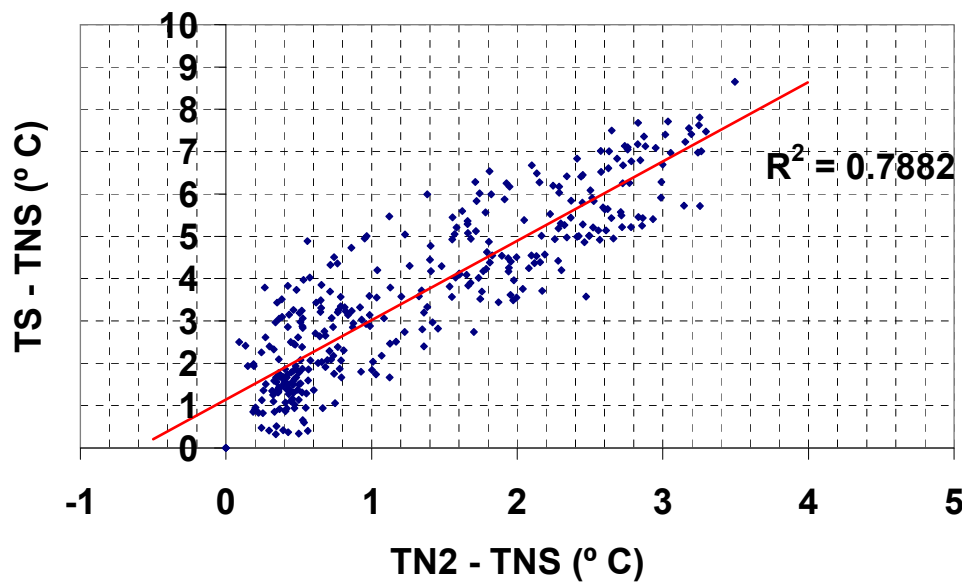


Figura 5.36. Se observa la relación no lineal entre la diferencia de temperaturas del sensor soleado y previo al filtro que ofrece la ventana y el sombreado frente a la diferencia de temperaturas entre el sensor soleado y posterior al filtro y el sombreado.

Así, se puede concluir que **el efecto de la radiación solar incidente sobre el sensor de temperatura de la superficie interior del vidrio depende linealmente de la radiación solar global incidente sobre la vertical**. Se demuestra, además, que **dicho efecto depende del ángulo de incidencia de la radiación solar directa pudiéndose, en principio, sustraer de la medida observada con un grado de precisión aceptable**.

No obstante, y dado que se dispone de una gran cantidad de datos experimentales, se identifica este fenómeno para su posterior estudio en condiciones que permitan controlar el efecto de otras variables meteorológicas y se procede al ajuste de los modelos de simulación en aquellos periodos en los que no incide la radiación solar directa sobre los vidrios.

5.2.5. AJUSTES DEL MODELO PARA CONDICIONES REALES DE USO: RESULTADOS.

Teniendo en cuenta los efectos descritos con anterioridad, se procede al ajuste del modelo de simulación durante los intervalos en los que el C-DdI se encuentra ocupado y acondicionado. Dado que los parámetros referentes a la construcción del C-DdI se han estimado durante la evolución libre, se mantendrán constantes a lo largo de este nuevo proceso de identificación. Algunos de ellos, como por ejemplo la infiltración, son susceptibles de variar con las condiciones de funcionamiento del C-DdI. No obstante, dadas las características de la experimentación, durante las condiciones reales de uso no se puede identificar de nuevo dicho parámetro evitando las correlaciones con otros parámetros. De hecho, en un sentido estricto la experimentación resuelve las correlaciones durante la evolución libre, que fue el modelo original de partida. **Para evitar las correlaciones en condiciones reales de uso habría que**

Evaluación energética experimental de edificios en condiciones reales de uso mediante el ajuste de modelos de simulación con aplicaciones al control predictivo

repetir la metodología de diseño del experimento con un modelo apropiado que tuviera en cuenta las variables implicadas en ese caso. Dicho modelo implicaría una descripción adecuada de los sistemas de climatización, de su control y de los efectos de la ocupación. Para este último punto se requiere de una medida precisa del intercambio de calor entre los ocupantes y el C-Ddl, así como información detallada sobre la presencia de ocupantes en las diferentes estancias.

En cualquier caso, se procede al ajuste de los parámetros del modelo implementado para las condiciones reales de uso, y teniendo el argumento anterior presente a la hora de analizar los resultados. Para el ajuste se emplea el mismo esquema que en el caso de la evolución libre, con diferencia en los periodos seleccionados de la serie temporal de datos experimentales para cada una de las variables de la función objetivo.

Dado que la serie temporal es lo suficientemente larga se pueden seleccionar diferentes periodos sin riesgo de perder información valiosa. Los periodos de estimación para la temperatura del aire interior corresponden al periodo de la serie temporal correspondiente al periodo climatizado en el que se han dejado fuera el arranque del C-Ddl después del periodo vacacional, evitando así posibles interferencias debido a transitorios por cambio de régimen de climatización del C-Ddl, que no son representativos de su comportamiento energético. En cuanto al ajuste para la temperatura de la superficie interior del vidrio, como se ha comentado con anterioridad, se elige durante el periodo en el que no hay incidencia de la radiación solar directa. El periodo seleccionado para el ajuste de la temperatura de la superficie del suelo interior se corresponde con el de funcionamiento del suelo radiante. De ese modo, se maximizan los aspectos de la dinámica del sistema que se pretende identificar.

En las siguientes líneas se analizan los resultados del ajuste del nuevo modelo para cada una de las variables implicadas en el estudio, dividido en dos periodos que se estudian por separado: en primer lugar el dominado por la refrigeración (horas 1500 a 2300 de la serie temporal asociada a 2009 y en segundo el dominado por la calefacción (horas 2600 a 3600 de la serie temporal asociada a 2009).

En la figura 5.37 se muestra la evolución temporal de la estimación de la temperatura del aire interior frente a su medida para el periodo de la serie temporal dominado por la refrigeración, observándose un acuerdo razonable en los extremos del periodo y desviaciones más acentuadas en la parte central.

En la figura 5.38 se muestran los residuos de la misma serie, donde se han destacado en rojo dos bandas, una correspondiente a 0.5 °C (en rojo, punteada. En adelante denominada banda de identificación) y otra correspondiente a 1 °C (en rojo, continua. En adelante banda de control). Para este periodo el 73% de los residuos caen dentro de la banda denominada de identificación. Así, **en un sentido estricto, durante el periodo de refrigeración el modelo no se puede considerar válido para discriminar los diferentes fenómenos físicos presentes en la dinámica y debe mejorarse introduciendo efectos como la ocupación, diseñando nuevos experimentos para ello.** No obstante, **como el 98% de los residuos se encuentran dentro de la denominada banda de control, es posible considerar el modelo como**

efectivo a propósitos de control durante el periodo dominado por la refrigeración. Este hecho está justificado por el hecho de que **la incertidumbre de los sensores empleados para el control del C-Ddl es muy superior a la de los empleados en la monitorización del mismo.** De hecho, se han empleado sensores de temperatura de tipo termistor, modelo TB/TS de TREND Controls. Estos sensores se encuentran conectados a dos hilos y presentan una incertidumbre de 0.5 °C y, además, se desconoce la longitud del cable tendido desde el transductor al convertidor, lo que añade una gran incertidumbre adicional. De hecho, se puede considerar que una incertidumbre asociada de 1 °C en el caso del control es optimista, pudiendo aumentarse hasta mayores valores. Así, **con la incertidumbre asociada al sistema de control implementado se puede considerar que el modelo representa fielmente el comportamiento térmico del C-Ddl durante el periodo de refrigeración, aunque desde la óptica de la identificación de los fenómenos físicos subyacentes no sea adecuado para la identificación unívoca de cada uno de los procesos implicados.** Este hecho es particularmente relevante y en el capítulo siguiente se presentarán algunas de sus aplicaciones en el control predictivo de edificaciones.

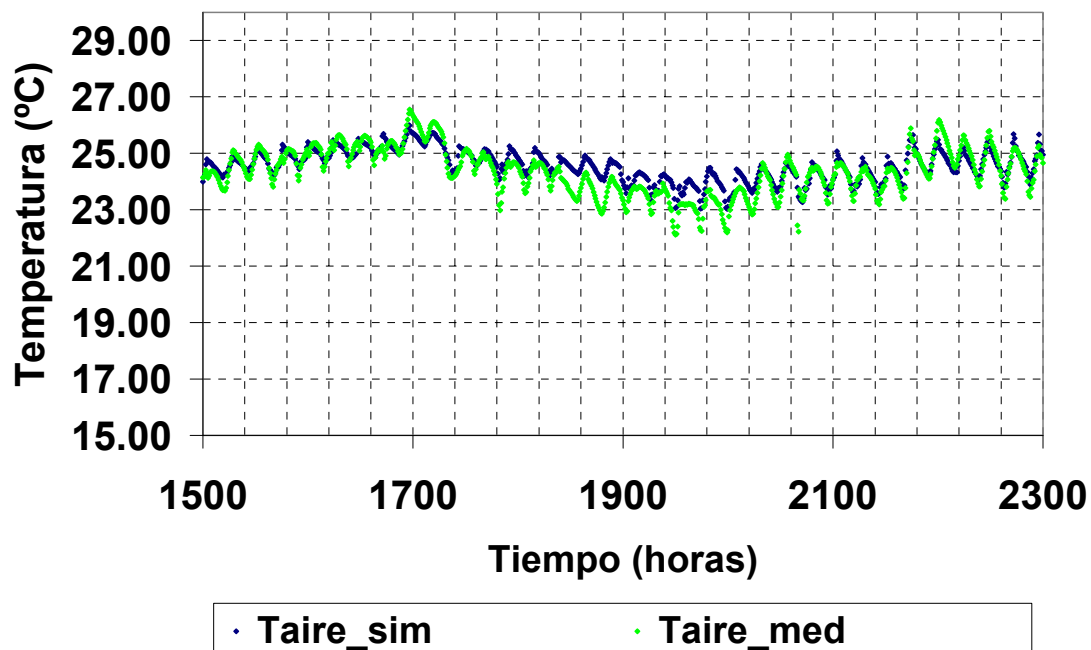


Figura 5.37. Evolución temporal de la estimación de la temperatura del aire interior frente a su medida para el despacho 13 en el periodo dominado por la refrigeración.

En la figura 5.39 se presentan los ajustes durante el mismo periodo para la temperatura de la superficie interior del vidrio frente a su medida. Como en el caso analizado previamente durante la evolución libre se observa un excelente acuerdo durante los periodos nocturnos, con desviaciones en el entorno de 0.5 °C. Para los periodos diurnos y especialmente en las horas cercanas al mediodía solar la diferencia entre la estimación y la medida aumenta. La desviación media se encuentra cerca de 2° C, con un máximo que supera ligeramente los 3 °C.

En este caso la simulación sobreestima la temperatura del vidrio. Como ya se ha analizado durante el periodo de evolución libre esta diferencia es la explicada por los fenómenos radiativos de onda larga que requieren de una ulterior modelización. De este modo **se comprueba, además, que la radiación solar directa no penetra a través del vidrio en el interior**, lo que era deseable en el periodo de refrigeración y así se especificó en las condiciones de diseño del C-Ddl, **por lo que el voladizo cumple su función de control solar.**

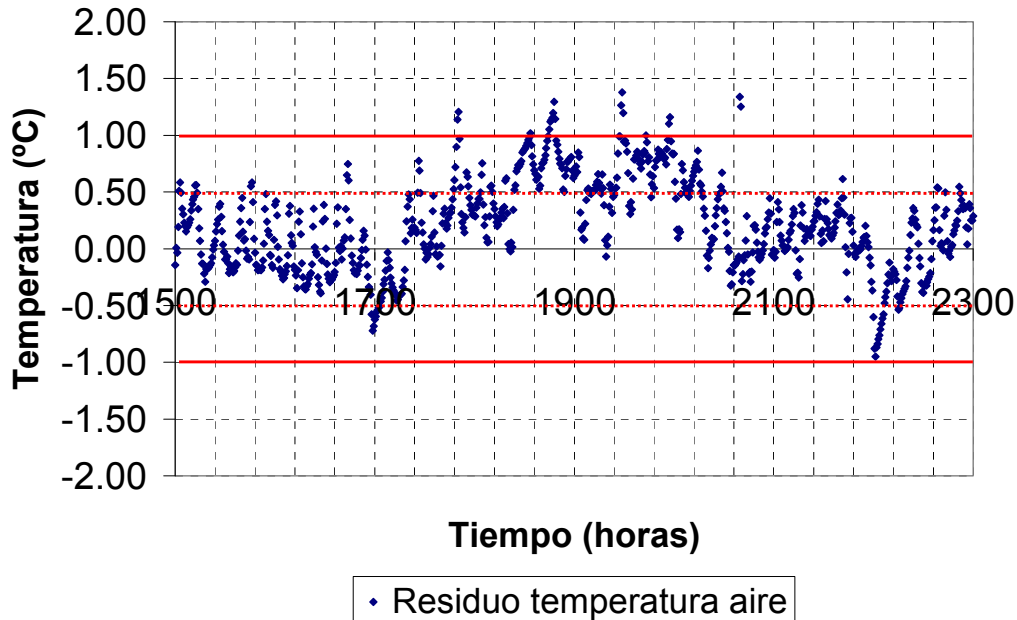


Figura 5.38. Residuos de la temperatura del aire interior del despacho 13 en el periodo dominado por la refrigeración.

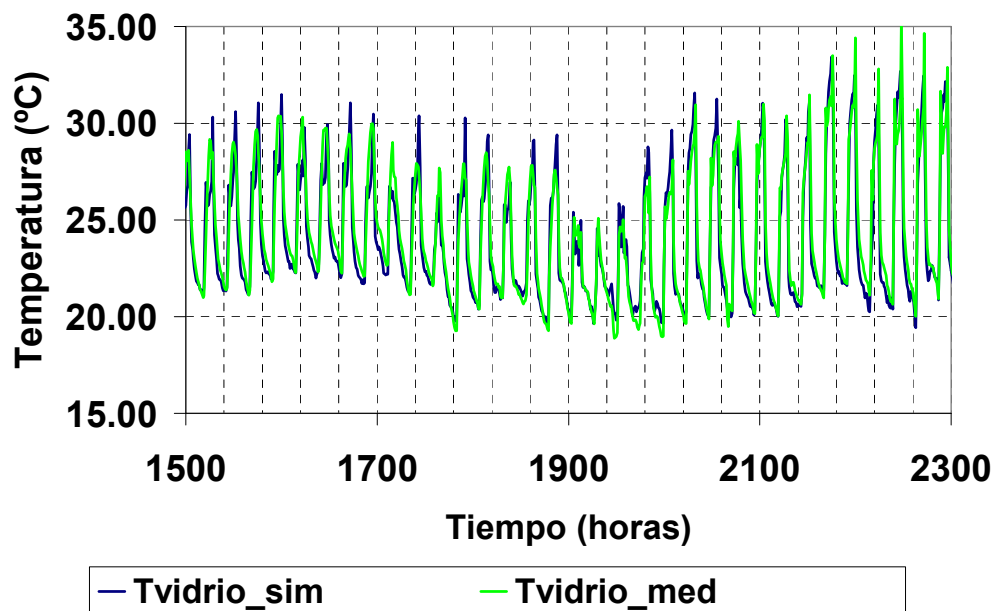


Figura 5.39. Ajuste y medida durante el periodo dominado por la refrigeración para la temperatura de la superficie interior del vidrio en el despacho 13.

Dado que durante este periodo el suelo radiante no ha entrado en funcionamiento ni se ha empleado la temperatura de la superficie interior del suelo en el ajuste, dicha variable no se presenta en el análisis de este periodo.

Se analiza ahora el periodo dominado por la calefacción. En la figura 5.40 se muestra la evolución temporal de la estimación de la temperatura del aire interior frente a su medida para este periodo. El suelo radiante comienza a funcionar aproximadamente a partir de la hora 2700. Se puede observar un ajuste razonable de la temperatura durante el inicio del periodo, con una divergencia creciente a medida que avanza el tiempo, lo que parece indicar que la interacción entre el suelo radiante y el terreno bajo el C-Ddl no responde satisfactoriamente a las medidas experimentales.

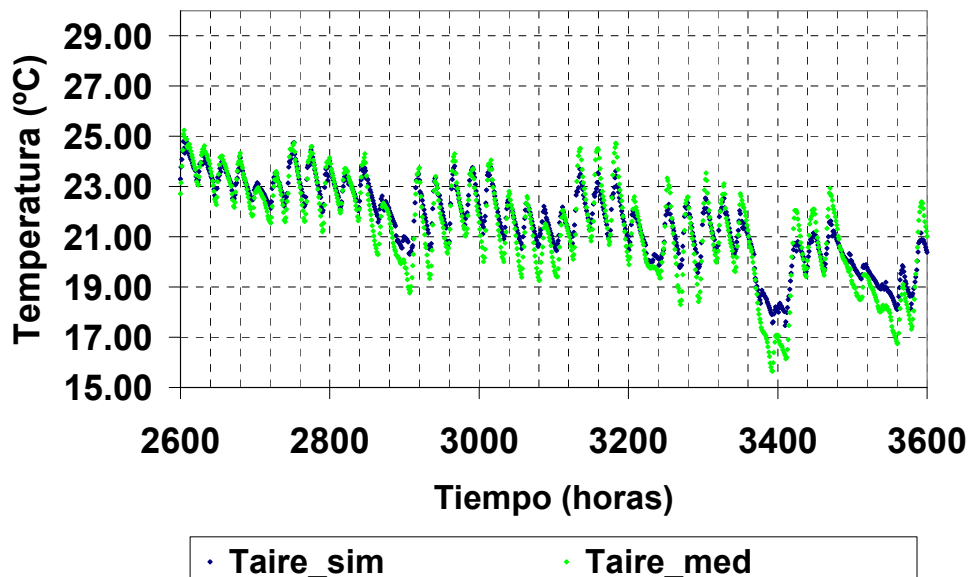


Figura 5.40. Evolución temporal de la estimación de la temperatura del aire interior frente a su medida para el despacho 13 en el periodo dominado por la calefacción.

Los residuos para la temperatura del aire interior durante el mismo periodo se presentan en la figura 5.41 en este caso el 54,9 % de los residuos se encuentran dentro de la banda de identificación mientras que el 84.1 % se encuentran dentro de la banda de control. Las desviaciones más acusadas quedan por debajo de los 2° C. Claramente, **el modelo es insatisfactorio para representar adecuadamente el comportamiento térmico del C-Ddl durante el periodo de calefacción con respecto a la identificación de los fenómenos físicos presentes**. Por otra parte, un 84% de los datos dentro de la banda de control es un valor que, aunque elevado, resulta arriesgado para aplicaciones de control. No obstante, como se dijo con anterioridad, la estimación de la incertidumbre asociada al sistema de control ha sido optimista, por lo que dicha banda podría superar con creces el grado Celsius impuesto. Así, **dado que la incertidumbre asociada al sistema de control probablemente se ha**

infraestimado se abre la posibilidad de emplear el modelo con propósitos relativos al control. No obstante, desde los estándares de calidad de la medida y de su modelo asociado la opción preferible es la mejora del modelo de intercambio de calor entre el suelo radiante y el terreno bajo el C-Ddl en primer lugar añadiendo modelos de conducción del calor multidimensional y diseñando nuevas experimentaciones al respecto.

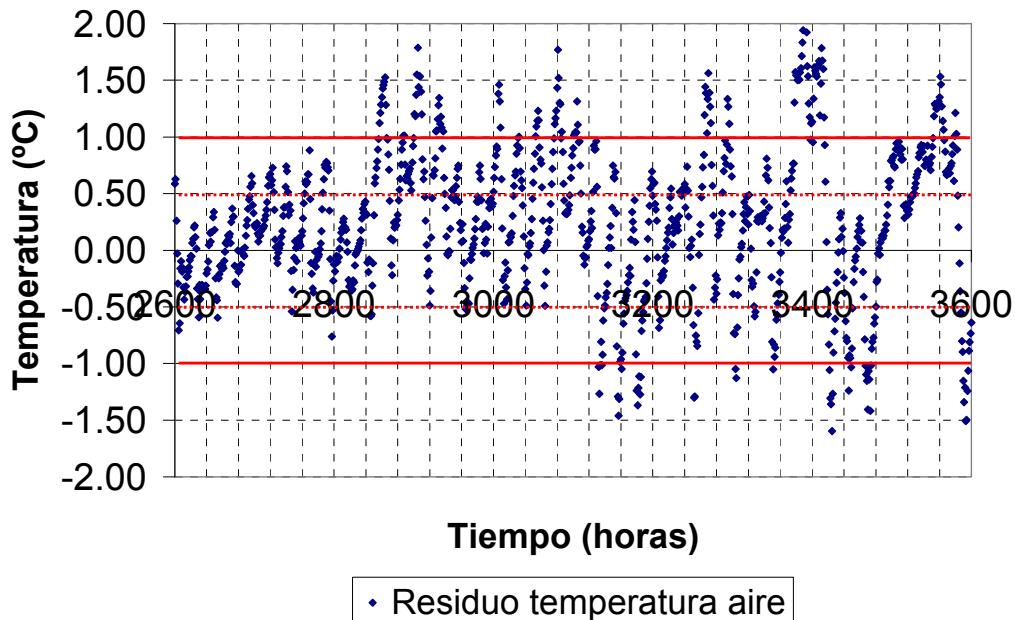


Figura 5.41. Residuos de la temperatura del aire interior del despacho 13 en el periodo dominado por la calefacción.

En la figura 5.42 se presentan los ajustes durante el mismo periodo para la temperatura de la superficie interior del vidrio frente a su medida. Durante este periodo se puede observar que la temperatura de la superficie interior del vidrio medida es notablemente superior a la estimada, lo que es un claro indicativo de que la radiación solar directa incide sobre el sensor de temperatura. **Esta medida de temperatura confirma que durante este periodo la radiación solar directa está penetrando en el interior del C-Ddl, ajustándose a los parámetros especificados en el diseño eficiente del mismo.** Al igual que en el periodo anterior, los acuerdos entre la estimación y la medida durante el periodo nocturno son excelentes, con desviaciones inferiores a 0.6 °C. Durante el día, sin embargo, las diferencias superan los 10°C alcanzando, en ocasiones, los 15 °C. Este hecho supera las estimaciones realizadas a través de la experimentación realizada con la muestra de vidrio a la intemperie.

No obstante, la situación del sensor en el interior del C-Ddl es diferente a la realizada durante la experimentación en intemperie. En primer lugar, la temperatura interior es más estable que la exterior y las velocidades del aire en el interior son menores que en el exterior, reduciendo el intercambio convectivo entre el sensor y el aire, lo que explica un cierto aumento en la temperatura. Por otra parte, a bajas alturas solares (como es el caso del periodo invernal) el ángulo de incidencia de la radiación solar directa sobre el vidrio y el sensor es menor,

acercándose más a la incidencia normal. Es posible que a esos ángulos de incidencia las características ópticas tanto del vidrio como del sensor sean diferentes a las condiciones de experimentación, proporcionando valores más elevados de la temperatura. En cualquier caso, este variable no ha sido empleada en la estimación de los parámetros asociados al modelo durante este trozo de la serie temporal.

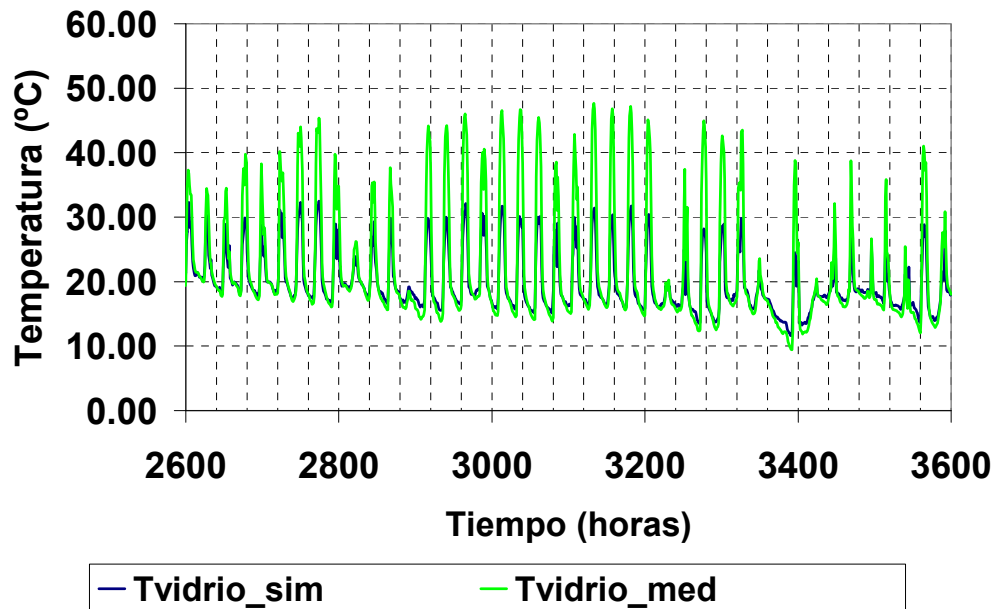


Figura 5.42. Ajuste y medida durante el periodo dominado por la calefacción para la temperatura de la superficie interior del vidrio en el despacho 13.

Una solución a este problema consistiría en la colocación de un dispositivo que arroje sombra sobre el sensor para así obtener una medida no contaminada por la irradiancia solar directa. No obstante, según lo estudiado con anterioridad, el modelo térmico efectivo del C-DdI resulta adecuado para los periodos dominados por la refrigeración, mientras que no lo es para los periodos dominados por la calefacción. Una de las aplicaciones del modelo efectivo ajustado, como se verá en el siguiente capítulo, es el desarrollo de modelos de orden reducido de la evolución temporal de la temperatura del aire interior de un edificio. Si el modelo de orden elevado es válido sólo en un periodo es un claro indicativo de que se debe disponer de diferentes modelos de orden reducido en función de la climatización empleada. La incidencia directa de la radiación solar es un indicativo de cuál modelo de bajo orden debe emplearse.

Sin embargo, con respecto a las posibles aplicaciones del modelo en el desarrollo de modelos de orden reducido, **se desaconseja sombrear el sensor en futuras monitorizaciones, puesto que se perdería información experimental relativa a la penetración de la radiación solar directa en el interior del sistema bajo estudio**. En lugar de sombrearlo se debe estudiar con mayor detalle el efecto cuantitativo de la incidencia de la radiación solar directa sobre la medida del conjunto vidrio-sensor-estancia.

Finalmente, en la figura 5.43 se muestra la evolución temporal de la medida de la temperatura del suelo interior frente a su medida. Como se ha notado con anterioridad en la evaluación de

la temperatura del aire interior, las discrepancias durante el funcionamiento del suelo radiante son manifiestas. Los valores máximos de dichas discrepancias están comprendidos en un intervalo entre 3 y 4 °C.

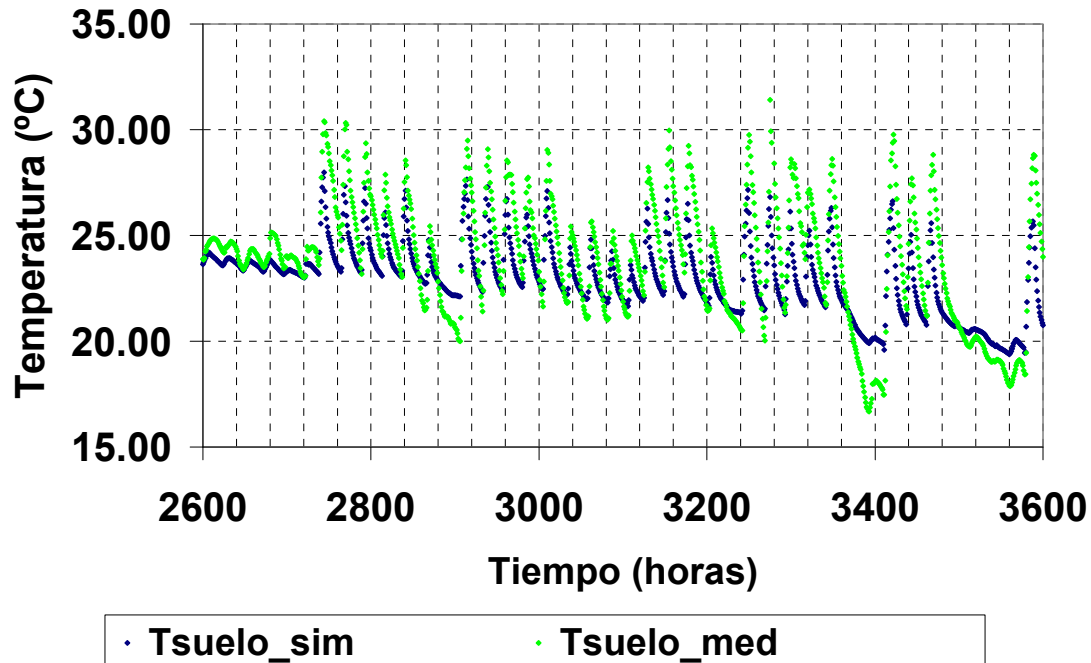


Figura 5.43. Evolución temporal de la medida de la temperatura del suelo interior frente a su medida en el despacho 13 durante el periodo dominado por la calefacción.

A modo de resumen, la tabla 5.7 muestra la desviación media de cada una de las variables para los diferentes periodos estudiados. Nótese que los valores para la temperatura del aire ofrecen valores siempre inferiores a los de las otras variables. Este hecho refuerza la hipótesis de que el modelo puede ser válido para representar la temperatura interior del aire y no la de las otras variables, cuyo único papel es el de aportar información adicional para discriminar parámetros en el ajuste del modelo.

Por otra parte, las desviaciones de la temperatura del aire son menores que la incertidumbre experimental durante los periodos de evolución libre y el dominado por la refrigeración, lo que apoya la idea de que el modelo es válido durante estos periodos. Por otra parte, la desviación asociada al periodo de calefacción es superior a la incertidumbre. Finalmente, **la desviación global durante el periodo climatizado es sólo ligeramente superior a la incertidumbre experimental, lo que da un indicativo de que las desviaciones del modelo durante el periodo de calefacción tienen un impacto moderado.** También se puede observar que en el caso de la temperatura de la superficie interior del vidrio la desviación en incidencia de la radiación solar directa es cerca de cinco veces superior a la de los otros dos periodos.

Una vez que se han analizado las series temporales, la interpretación física de los parámetros estimados ha de ser tomada en cuenta, al igual que en el caso de la estimación de los

parámetros del modelo durante el periodo de evolución libre. La tabla 5.8 muestra los parámetros estimados del modelo en condiciones reales de uso.

	RMSE aire	RMSE vidrio	RMSE suelo
Evol. libre	0.31	1.28	1.26
Refrig.	0.45	1.16	2.18
Calef.	0.70	5.04	2.34
Total Climat.	0.59	3.32	2.01

Tabla 5.7. Desviación media de cada una de las variables para los diferentes periodos estudiados.

Parámetro	Ajuste
Coeficiente de pérdidas efectivo Suelo radiante	30.75
Ventilación (UTA) (1/h)	4.11
Intercambio pasillo (1/h)	0.10
Porcentaje de ganancia convectivo	0.56
Convección suelo en funcionamiento (kJ/hm ² K)	6.63
Convección suelo inerte (kJ/hm ² K)	2.65

Tabla 5.8. Parámetros estimados del modelo en condiciones reales de uso.

Con respecto al **coeficiente de pérdidas efectivo del suelo radiante**, el intercambio de aire con el pasillo y el porcentaje de ganancia convectivo de la disipación de calor de los aparatos eléctricos no se tienen valores físicos de referencia, por lo que no se pueden juzgar más allá de destacar que **se encuentran dentro del rango aceptable físicamente**.

Los coeficientes de convección del suelo también se encuentran dentro del rango de validez física. De hecho, en el caso bajo condiciones reales de uso resulta arriesgado aplicar correlaciones obtenidas en estudios anteriores, dado que existen usuarios y mobiliario que perturban dinámica e incontroladamente la geometría asociada a dicho intercambio. No obstante, se obtiene una conclusión interesante: **el coeficiente de convección del suelo mientras se encuentra en funcionamiento el suelo radiante es muy superior al valor del coeficiente cuando el suelo es inerte**. Este hecho indica, **por tanto**, y como cabía esperar **el coeficiente global de pérdidas del suelo depende del funcionamiento de la capa activa**. Este hecho previene conceptualmente de análisis energéticos de las edificaciones donde la constancia del coeficiente global de pérdidas es una hipótesis fundamental.

Finalmente, la cantidad de aire introducida por la UTA da un resultado de 4.11 renovaciones a la hora que, la geometría de la estancia bajo estudio se convierte en un valor de 184.95 m³/h de caudal de aire en concepto de ventilación mecánica. Este valor se puede comparar con el caudal de diseño del sistema de ventilación mecánica del C-Ddl, que para el caso que nos ocupa asciende a 170 m³/h. Así, **el valor estimado por el modelo para el caudal de aire introducido por el sistema de ventilación mecánica se desvía menos de un 10% del valor nominal de diseño de la instalación**. Aunque se trata de un resultado relevante, en la

situación real nada asegura que se respete el caudal nominal, pues puede haber defectos en la instalación.

Dado que el diseño experimental incorpora sensores de concentración de dióxido de carbono en el aire interior, se puede emplear éstos para estimar las renovaciones de aire introducidas por el sistema de ventilación mecánica. Para ello, se pueden buscar días en la serie temporal en la que los usuarios hayan abandonado la estancia y dejado la puerta cerrada mientras la UTA sigue en funcionamiento. En ese caso, la concentración de CO_2 en el aire interior será superior al ambiente y comenzará una caída exponencial, como se deduce en el método de la caída de la concentración para la estimación del caudal de ventilación.

En la figura 5.44 se muestra el fenómeno para un día concreto. Se puede observa que al final de la jornada, cuando la puerta se encuentra cerrada, la concentración de CO_2 en el aire interior comienza su caída exponencial, permitiendo, en un principio, el cálculo de la tasa de renovaciones introducida por el sistema mecánico de ventilación. Hay que tener en cuenta que la incertidumbre asociada a estos sensores es elevada (del orden de 50 ppm), por ello se tienen que buscar los días en los que además de que la puerta quede cerrada la concentración de CO_2 en el aire interior supere al menos dos veces la incertidumbre la concentración de CO_2 en el aire exterior.

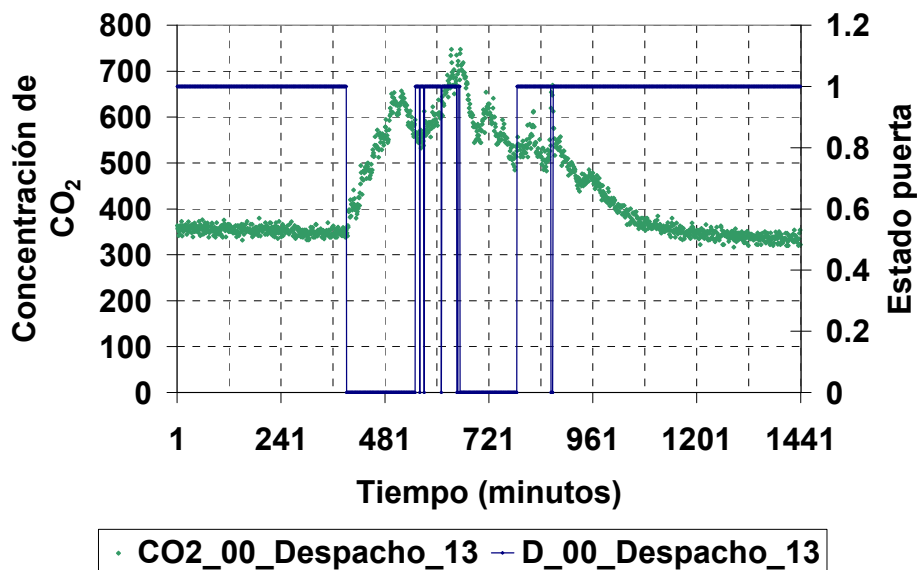


Figura 5.44. Caída de la concentración de CO_2 en el aire interior del despacho 13 al desocuparse.

Para la serie de 2009 hay 35 días en los que la concentración de CO_2 del aire interior supera al menos en 100 ppm la concentración de CO_2 en el aire exterior, tras cerrarse la puerta y con la ventilación mecánica en funcionamiento. Podría pensarse en emplear este método para estimar también la infiltración cuando se produjera el mismo fenómeno con la UTA parada. No obstante, en la serie analizada no sucede dicho fenómeno.

P	C ₀ (ppm)	t _v (h)	V _{sc} (1/h)	V _c (1/h)	ΔV (1/h)
0.60	450.92	5.00	0.17	1.02	0.24
0.98	452.59	5.00	0.28	3.51	0.26
1.00	467.40	4.00	0.31	4.06	0.25
0.88	511.41	3.00	0.41	5.16	0.24
0.98	500.53	3.00	0.36	2.72	0.24
0.78	537.35	4.00	0.44	3.60	0.24
0.33	459.46	3.00	0.27	2.38	0.25
0.53	448.60	3.00	0.26	2.92	0.26
0.52	467.93	3.00	0.31	3.61	0.25
0.33	459.46	3.00	0.27	2.38	0.25
0.53	448.60	3.00	0.26	2.92	0.26
0.52	467.93	3.00	0.31	3.61	0.25
0.55	493.79	2.00	0.32	2.09	0.24
0.55	511.27	2.00	0.35	2.17	0.24
0.57	484.52	2.00	0.31	2.19	0.24
0.75	479.65	2.00	0.31	2.36	0.25
0.53	493.44	2.00	0.33	2.29	0.24
0.08	490.95	2.00	0.15	0.60	0.22
0.83	483.93	2.00	0.34	3.19	0.25
0.63	462.06	2.00	0.30	3.89	0.25
0.13	467.87	2.00	0.30	2.98	0.25
0.53	465.03	2.00	0.28	2.39	0.25
0.85	470.87	2.00	0.28	2.09	0.25
0.95	452.88	2.00	0.26	2.53	0.25
0.27	506.68	2.00	0.35	2.22	0.24
0.88	524.97	2.00	0.39	2.59	0.24
0.53	511.98	2.00	0.34	1.99	0.24
0.60	515.55	2.00	0.37	2.43	0.24
0.95	481.83	2.00	0.32	2.60	0.25
0.88	457.59	2.00	0.27	2.53	0.25
0.93	470.85	2.00	0.27	1.96	0.25
0.98	475.13	2.00	0.29	2.15	0.25
0.95	603.53	3.00	0.48	2.02	0.22
0.95	550.95	2.00	0.46	3.21	0.23

Tabla 5.9. Datos para la estimación de la tasa de renovaciones del aire en concepto de ventilación mecánica.

En la tabla 5.9 se presentan los datos relativos a cada día: el porcentaje de cierre de la puerta durante la última hora antes de permanecer cerrada hasta el día siguiente (P), la concentración de CO_2 en el aire interior en dicha hora (C_0), el tiempo en horas que permanece encendida la ventilación mecánica tras cerrarse la puerta (t_v), la estimación de las renovaciones hora en concepto de ventilación calculadas sin efectuar correcciones de atmósfera contaminada (V_{sc}), la estimación de las renovaciones hora en concepto de ventilación mecánica calculadas por el mismo método y efectuando las correcciones por atmósfera contaminada (V_c) y, finalmente, la incertidumbre asociada a la ventilación estimada mediante la propagación de los errores de los sensores. Se ha tomado la media de la concentración de CO_2 en el aire exterior para efectuar la corrección por atmósfera contaminada.

La incertidumbre de todas las estimaciones presenta valores similares, en torno a 0.25 renovaciones hora, con un máximo de 0.26 y un mínimo de 0.22. Se toma el máximo de todas las incertidumbres como incertidumbre global de la estimación. Asimismo, se observa que los valores estimados de renovaciones hora para la ventilación mecánica en el caso de atmósfera sin corregir resultan demasiado pequeños para un sistema activo, del orden la infiltración estimada durante la evolución libre. Así, **para la estimación de las renovaciones hora mediante el método de la caída de la concentración con la concentración de CO_2 como indicador se debe conocer la concentración de CO_2 del aire de renovación.** En el caso que nos ocupa, la UTA puede renovar el aire directamente del exterior o recircularlo desde el interior del C-Ddl hasta el despacho nuevamente. Dado que se desconoce la concentración de CO_2 del aire impulsado por la UTA se supone que todo proviene del exterior para corregir las estimaciones, obteniéndose valores que dependen de dos factores: la fracción de apertura de la puerta durante la última hora y el tiempo de ventilación mecánica posterior al cierre de la puerta. En la tabla 5.9. se han agrupado por colores los datos relativos al tiempo de ventilación mecánica posterior al cierre de la puerta. Se señalan en verde los que presentan un tiempo superior a 4 horas, en amarillo un tiempo de 3 horas y en color canela un tiempo de 2 horas.

Las renovaciones hora asociadas a los tiempos de ventilación de dos horas presentan una estimación estable en torno a dos renovaciones y media por hora. En este punto hay que destacar que la estimación de la caída de concentración se hace precisamente con la media a las dos horas y la fracción de funcionamiento de la UTA durante la última hora no es total, cambiando el régimen de intercambio e invalidando las hipótesis del cálculo.

Por otra parte, las estimaciones de las renovaciones hora para tiempos de ventilación posteriores al cierre de la puerta iguales o superiores a 3 horas presentan una gran dispersión en los resultados, desde un valor de 1.02 hasta 5.16. En esta dispersión se puede notar una clara influencia del porcentaje de puerta cerrada al inicio de la caída de la concentración. Al igual que en el caso del funcionamiento de la ventilación mecánica, en un sentido estricto habría que exigir que la puerta se encontrase completamente cerrada durante la hora previa al comienzo del cálculo, permitiendo la estabilización de la concentración. En ese caso, **se estima un valor de renovaciones basado en la caída de la concentración de CO_2 en el**

aire interior obteniendo un valor de renovaciones por hora igual a 4.06, valor extremadamente cercano al obtenido por el modelo, 4.11.

No obstante, sólo un punto cumple con los requisitos, con lo que la validez estadística del resultado pudiera cuestionarse. Por ello, se relaja la condición de cierre de la puerta admitiendo valores mayores o iguales a 0.75, obteniéndose una media de 3.51 renovaciones por hora que, sumados a la incertidumbre, no se desvían demasiado de la cantidad de aire estimada por el modelo. Se puede concluir que, **desde el punto de vista de la estimación del caudal de aire introducido por la ventilación mecánica la caída de la concentración de CO₂ en el aire interior y en condiciones reales de uso se muestra como una técnica de análisis dinámico prometedora.**

Así, todos los parámetros estimados por el modelo encuentran una interpretación física aceptable, se comprueba que el coeficiente de convección del suelo depende del funcionamiento de la capa activa y se obtiene un caudal de ventilación mecánica con desviaciones inferiores al 10 % de los valores de diseño y menores al 5% de los valores obtenidos experimentalmente mediante el método de la caída de la concentración.

Como se ha comentado en la modelización del sistema de climatización por aire, existe una comprobación adicional a realizar: el balance entálpico del aire para obtener el rendimiento del inductor. No obstante, debido a problemas técnicos, la instalación del caudalímetro no cumplió con las especificaciones proporcionadas desde el diseño del experimento, instalándose éste en la rama principal de distribución al inductor en lugar de en la rama de intercambio solicitada, previo en lugar de posterior a la válvula de tres vías que da acceso al intercambio activo. El efecto sobre la estimación de la energía es sutil y se tardó en identificar dicho efecto, por lo que los datos tomados durante el periodo de análisis no son válidos para el cálculo detallado del rendimiento del inductor. En lugar de toda la energía depositada, con la configuración implementada se obtiene una cota superior a la misma.

No obstante, la relación de inducción se puede calcular, a modo de confirmación que la modelización adoptada no se desvía de la situación real de análisis. Para ello, se calcula la temperatura de impulsión realiza un balance entálpico entre el aire de impulsión de la UTA y el de la sala, supuesta una relación de inducción determinada. Acto seguido se realiza un ajuste de regresión entre la temperatura medida y la calculada y se toma la relación de inducción que mejor coeficiente de correlación presente. Para evitar efectos no medidos en el intercambiador se filtra la serie para los valores en los que la válvula de paso al intercambiador se encuentra cerrada y, por tanto, no existe aporte energético adicional. Asimismo, para evitar perturbaciones en la relación de inducción y dado que se dispone de una gran cantidad de datos en la serie, también se filtra para aquellos instantes en los que la puerta se encuentra cerrada. La figura 5.45 muestra los resultados del ajuste, con un excelente acuerdo con un coeficiente de correlación igual a 0.9486, correspondiente a una relación de inducción 1 a 6.

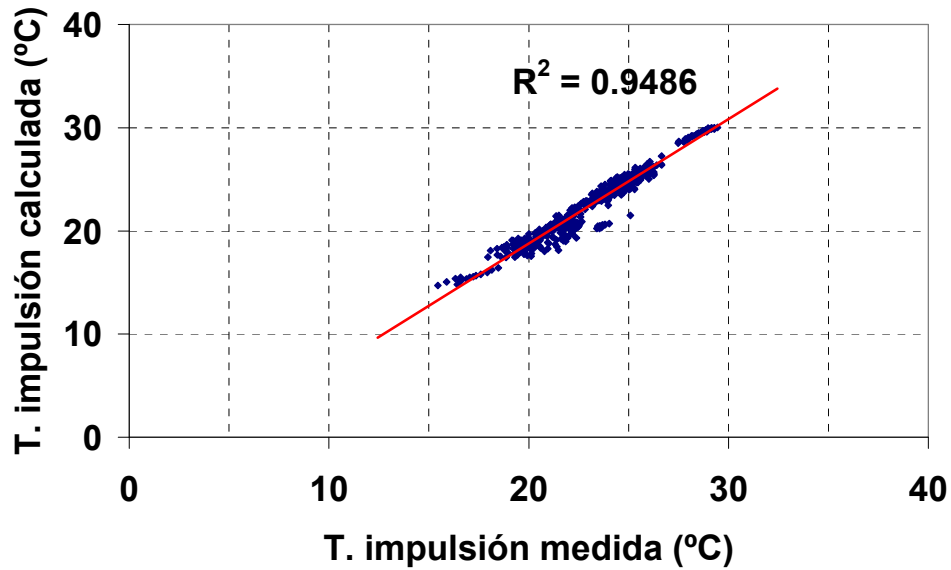


Figura 5.45. Correlación existente entre la temperatura de impulsión medida y calculada sin aporte energético en el intercambiador y con la puerta cerrada.

La figura 5.46 muestra el mismo ajuste para la serie sin filtrar por intercambio en el inductor. En ese caso se comprueba que el ajuste empeora hasta un coeficiente de correlación de 0.9109, lo que corrobora el hecho de que en la mayoría de las situaciones el mayor aporte energético proviene de el tratamiento en la UTA. Por otra parte, tras consulta al fabricante sobre la relación de inducción del inductor en la configuración escogida para el C-Ddl, este ofrece un valor de 5.25. Por tanto, **el valor estimado para la relación de inducción en el inductor y el estimado mediante los datos experimentales presentan un grado de acuerdo razonable, lo que indica que el modelo escogido para el caudal de aire impulsado en el interior de la estancia por el sistema de ventilación mecánica es adecuado para la estimación de la dinámica térmica del C-Ddl.** Por otra parte, aunque un defecto técnico en la colocación del caudalímetro por parte de los instaladores impide el cálculo del rendimiento del inductor, el modelo de ventilación mecánica introducido y estimado permite el análisis posterior de su demanda energética.

Finalmente, el estudio no quedaría completo si no se evaluase la capacidad predictiva del modelo ajustado. Para ello, hay que comparar el modelo ajustado con otra serie temporal de datos que no haya sido empleada y que sea lo suficientemente larga. Dado que se dispone de la serie de 2010, se emplea ésta para comprobar la validez del ajuste del modelo. Dado que es una comprobación de la validez y no del ajuste solamente se presentan los resultados para la temperatura del aire interior. En la figura 5.47 se muestra la evolución temporal de la estimación de la temperatura del aire interior frente a su medida. Se observa que la estimación de la temperatura del aire interior se mantiene siempre en un entorno de la medida, lo que indica que **el modelo estimado es estable, lo que no está asegurado que así sea con los modelos empíricos obtenidos a partir de datos experimentales.** Las discrepancias entre los valores estimados por el modelo y los medidos experimentalmente decrecen con el tiempo.

Este hecho es coherente con lo expuesto anteriormente. En esta serie temporal el comienzo es un periodo dominado por la calefacción, mientras que a medida que pasa el tiempo la refrigeración comienza. Así, **la ejecución del modelo en la serie de 2010 confirma los resultados de las estimaciones previas: presenta mejor comportamiento en refrigeración que en calefacción.**

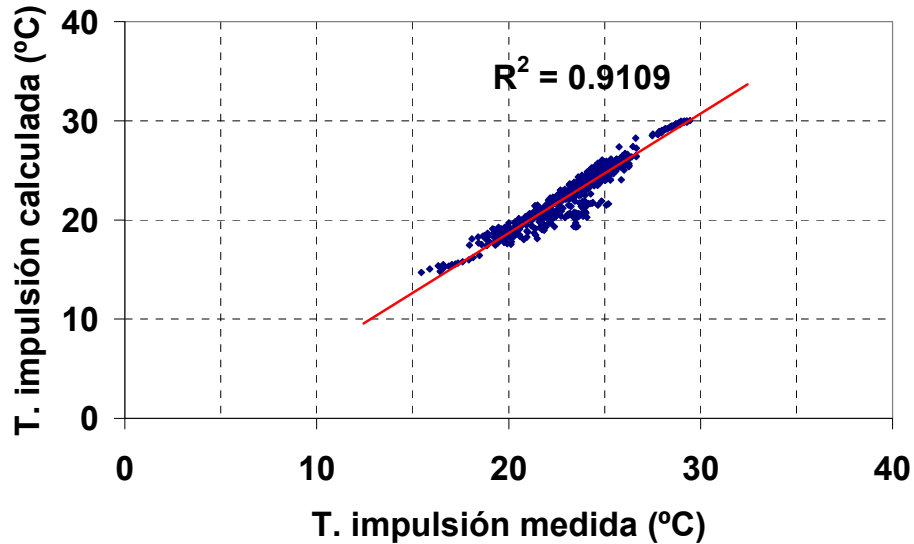


Figura 5.46. Correlación existente entre la temperatura de impulsión medida y calculada sin eliminar el intercambio de calor en el inductor y con la puerta cerrada.

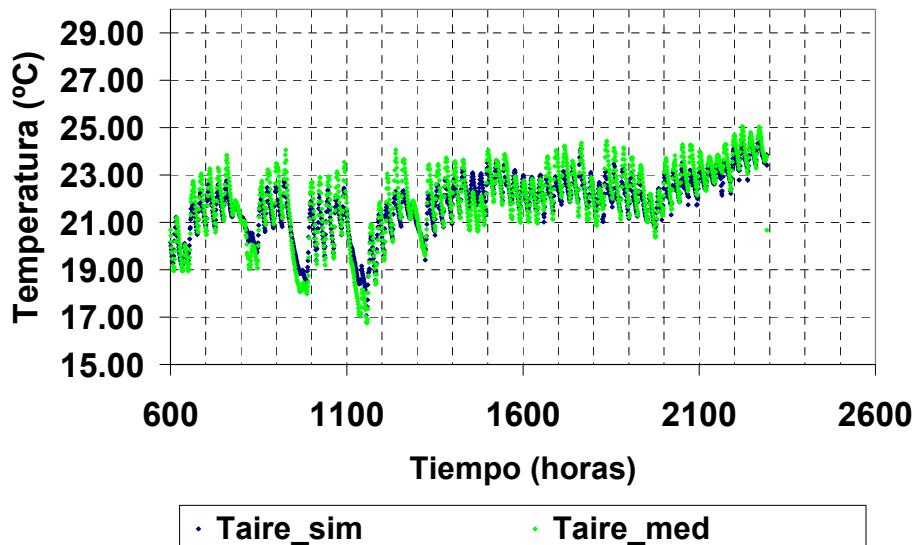


Figura 5.47. Evolución temporal de la estimación de la temperatura del aire interior frente a su medida para el despacho 13 en la serie de datos de 2010.

En la figura 5.48 se muestran los residuos de la temperatura del aire para la serie de 2010. En este caso el 55% de los datos se encuentra dentro de la banda de identificación y el 88% se

encuentran dentro de la banda de control, lo que implica que la serie de 2010 confirma el hecho de que el modelo en **condiciones reales de uso es insatisfactorio desde el punto de vista de la identificación de los fenómenos físicos relativos al comportamiento térmico, aunque como modelo efectivo representa bien el comportamiento desde el punto de vista del control del C-Ddl.**

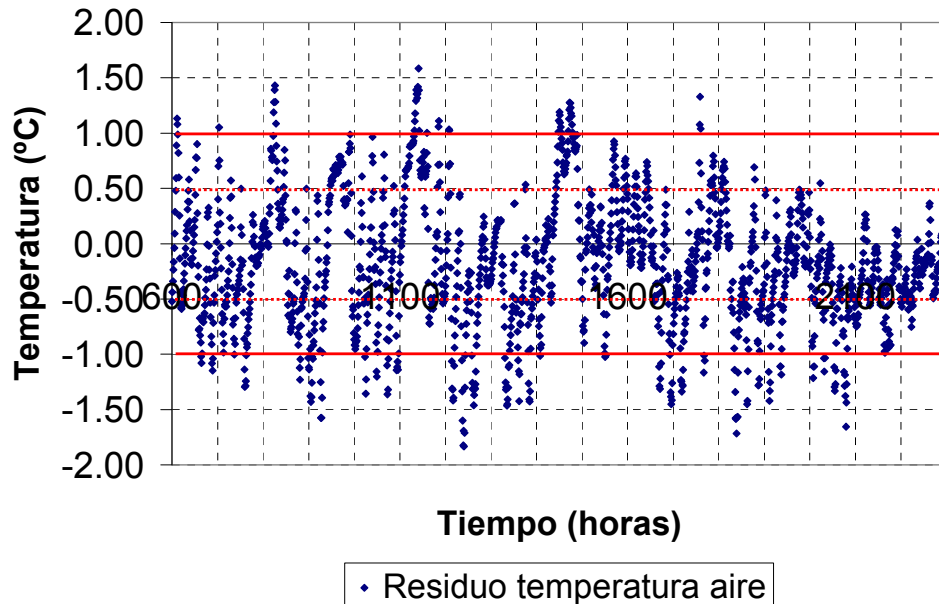


Figura 5.48. Residuos de la temperatura del aire interior frente a su medida para el despacho 13 en la serie de datos de 2010.

Aunque se ha tenido la precaución de comparar los resultados entre diferentes series temporales para el mismo despacho, desde el punto de vista de la universalidad del método, el mismo debe ser aplicado a otras situaciones. En la siguiente sección se presentan los resultados de la aplicación del método a los otros despachos seleccionados como instalación experimental.

5.3. GENERALIZACIÓN A OTROS DESPACHOS

En esta sección se aplica la misma metodología a los otros dos despachos seleccionados en la monitorización. En primer lugar se ajusta la evolución libre del despacho de becarios. Se toma el mismo modelo que en el caso del ajuste del despacho 13 y se introduce en la metodología de estimación de parámetros libres. En la figura 5.49 se muestra la evolución temporal de la temperatura del aire interior estimada mediante simulación y medida experimentalmente. Se puede observar un buen acuerdo entre las estimaciones teóricas y experimentales.

Este acuerdo lo confirman los residuos de la serie, mostrados en la figura 5.50. **Los residuos se encuentran al 100% dentro de la banda de incertidumbre experimental**, por lo que se puede considerar el **modelo adecuado para representar de forma efectiva los diferentes**

fenómenos físicos involucrados en la evolución libre del sistema en el despacho de becarios.

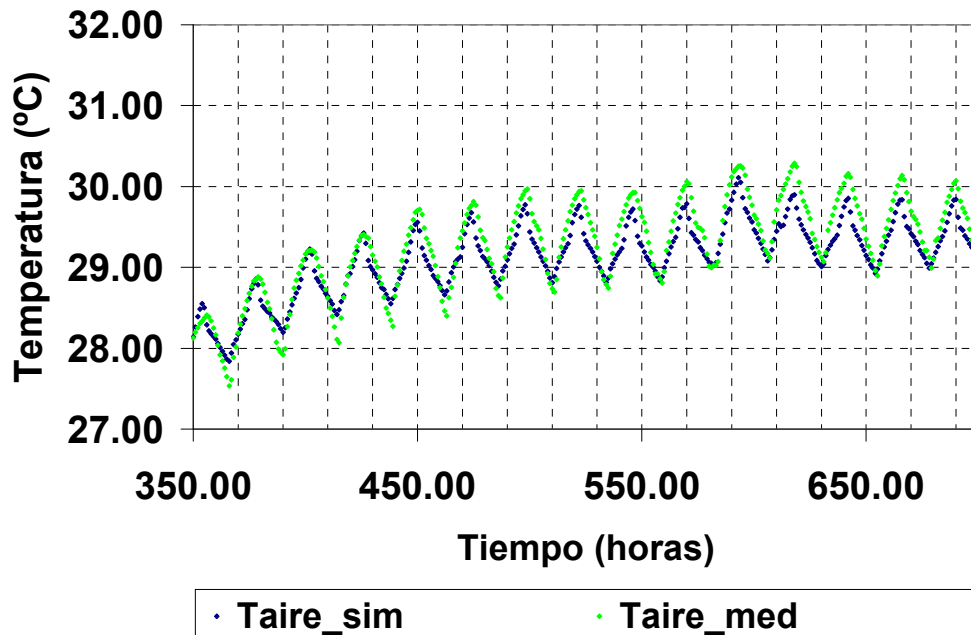


Figura 5.49. Evolución temporal de la estimación del modelo ajustado y de los datos experimentales correspondientes a la temperatura del aire interior del despacho de becarios durante la evolución libre de 2009.

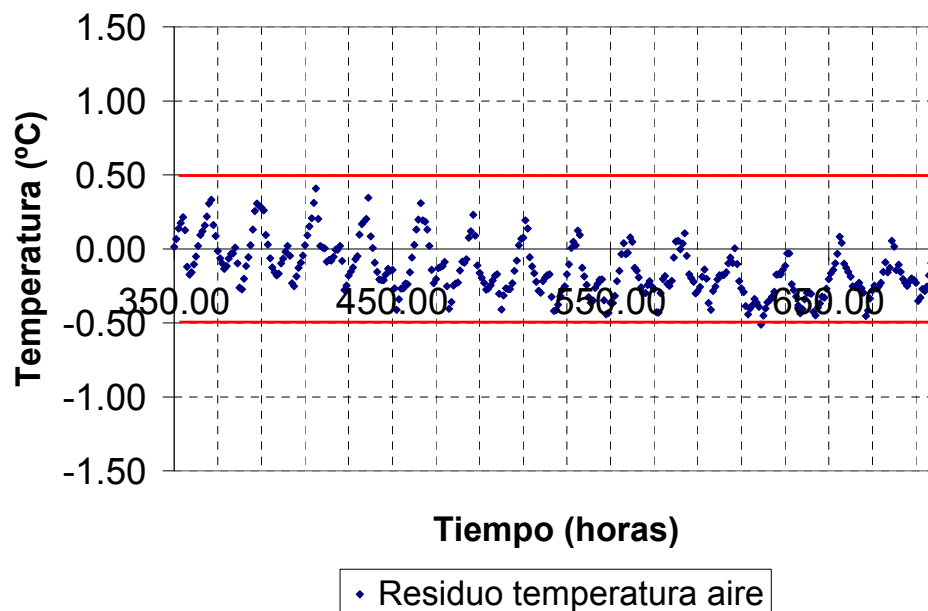


Figura 5.50. Residuos correspondientes a la temperatura del aire interior del despacho de becarios durante la evolución libre de 2009.

En la tabla 5.10 se presentan los valores de los parámetros estimados para el periodo de evolución libre en el despacho de becarios. Los valores se encuentran dentro de las hipótesis

realizadas en el análisis del despacho 13, destacando el caso del ajuste efectivo del suelo, que respalda la hipótesis de que se trata de un fenómeno no lineal. Por otra parte, el elevado coeficiente de absorción y la ausencia de sombreadamiento parece contradecir lo esperado por el diseño optimizado energéticamente para el C-Ddl.

No obstante, al igual que en el caso del despacho 13 e identificado por el método de diagnóstico, pudiera ser que la realidad no se correspondiese con los criterios especificados en el diseño. Por ello se procede a la verificación visual, cuyo resultado se muestra en la figura 5.51. En dicha figura se observa que la radiación solar incide sobre la cubierta norte, pese a la estructura de captadores diseñada. De ese modo, **el ajuste de los parámetros libres del modelo en otro despacho muestra coherencia con los resultados anteriores identificando, una vez más, las discrepancias entre la situación diseñada y la real.**

Parámetro	Valor nominal	Ajuste
Poliuretano proyectado conductividad (kJ/hmK)	0.144	0.131
Convección exterior (kJ/hm ² K)	4.000	12.330
Absortividad exterior	0.400	0.580
Hormigón suelo conductividad (kJ/hmK)	8.280	7.422
Mortero monocapa capacidad (kJ/hkgK)	1.100	0.718
Poliestireno espesor (m)	0.040	0.037
Convección exterior (kJ/hm ² K)	3.000	7.890
Absortividad exterior	0.700	0.842
Infiltración (1/h)	0.600	0.360

Tabla 5.10. Valores de los parámetros estimados para el periodo de evolución libre en el despacho de becarios.



Figura 5.51. Fotografía de la cubierta al norte. Se puede observar que la estructura de captadores permite el paso de la radiación solar directa hasta la superficie horizontal.

Una vez que se han estimado los parámetros del modelo durante la evolución libre, se procede a la estimación del resto de los parámetros durante las condiciones reales de uso. La evolución temporal de la temperatura del aire interior estimada durante el periodo dominado por la refrigeración se puede observar en la figura 5.52 y en la 5.53 los residuos de la misma serie.

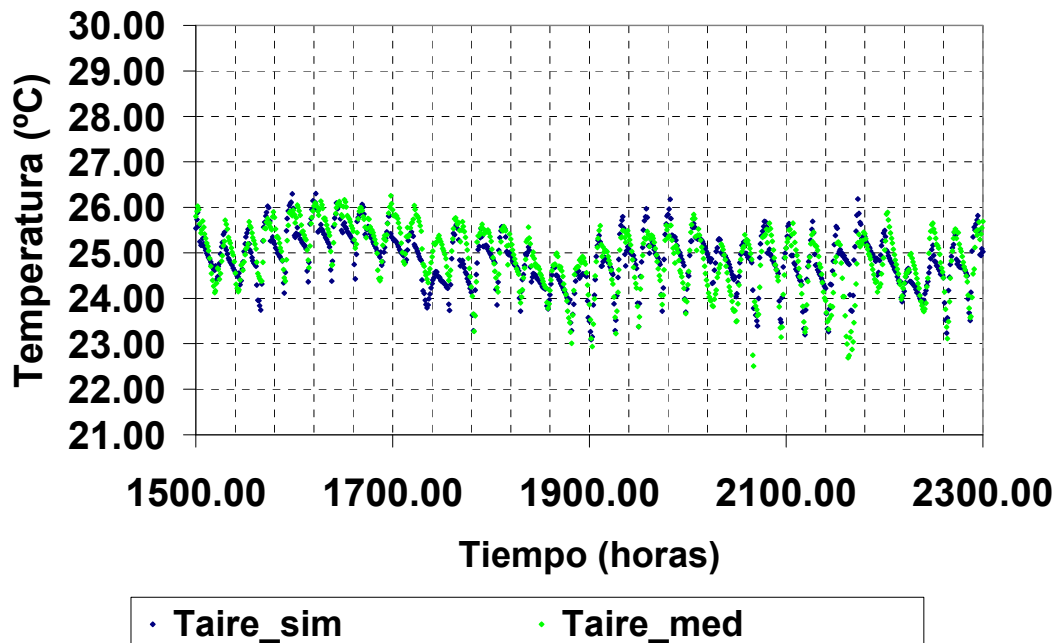


Figura 5.52. Evolución temporal de la temperatura del aire interior del despacho de becarios medida y estimada mediante el modelo ajustado durante el periodo dominado por la refrigeración.

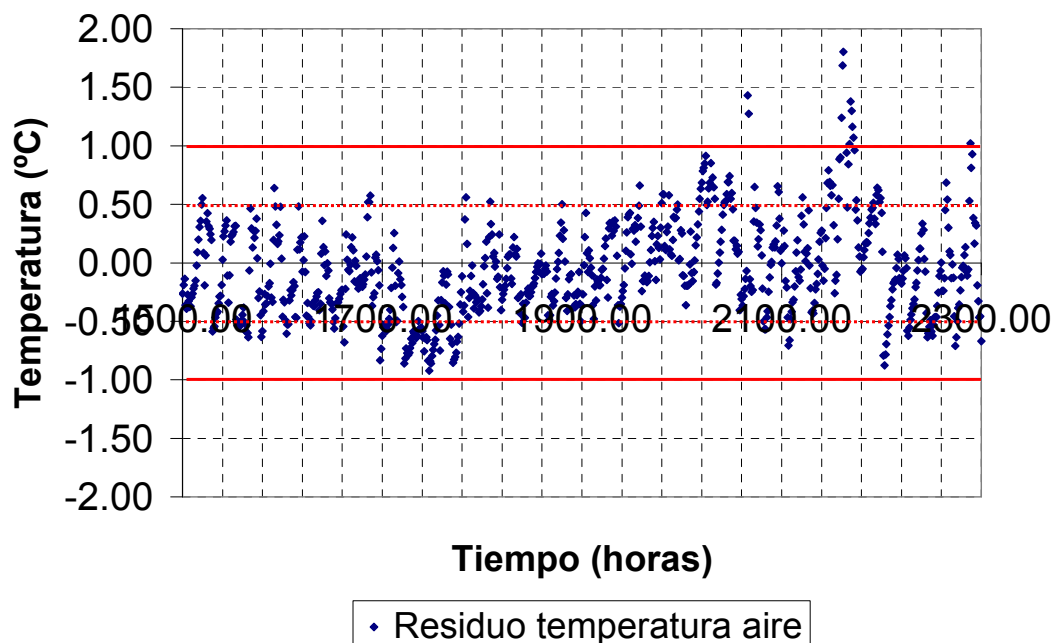


Figura 5.53. Residuos de la temperatura del aire interior del despacho de becarios durante el periodo dominado por la refrigeración.

Se puede observar que, **durante el periodo dominado por la refrigeración prácticamente el 100% de los residuos se encuentran dentro de la banda de control y un elevado porcentaje dentro de la banda de identificación.** De ese modo, se comprueba que el modelo desarrollado para uno de los despachos es válido en otro de los despachos tanto en evolución libre como durante el periodo dominado por la refrigeración.

La evolución temporal de la temperatura del aire interior estimada durante el periodo dominado por la refrigeración se puede observar en la figura 5.54 y en la 5.55 los residuos de la misma serie.

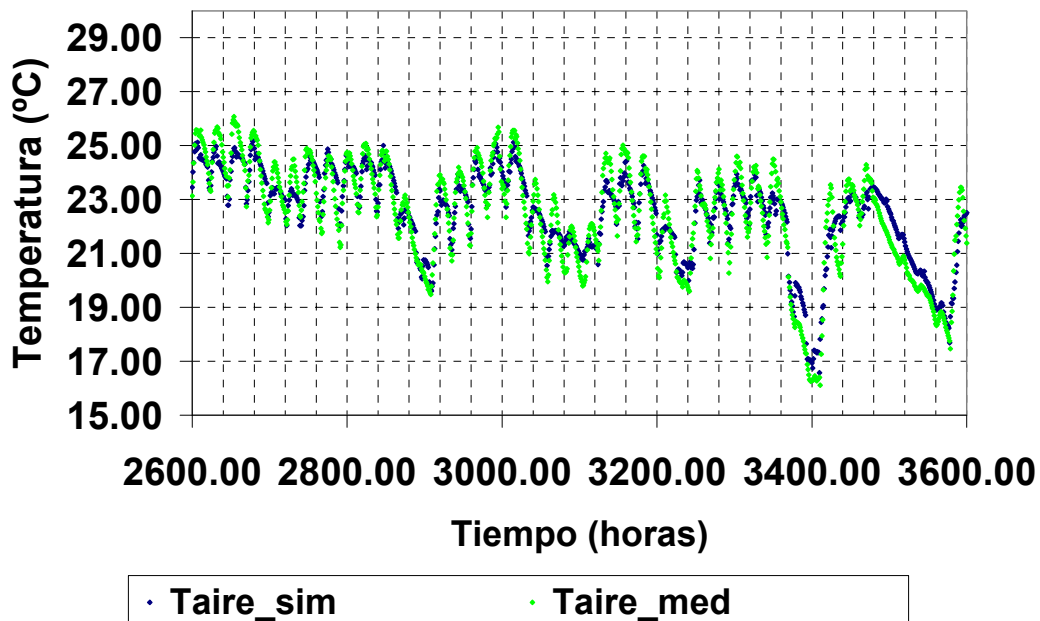


Figura 5.54. Evolución temporal de la temperatura del aire interior del despacho de becarios medida y estimada mediante el modelo ajustado durante el periodo dominado por la calefacción.

Al igual que sucedía en el caso del despacho 13, el periodo dominado por la calefacción ajusta peor a los datos experimentales. Aunque el porcentaje de puntos fuera de la banda de control no resulta particularmente elevado, siguiendo el mismo criterio que en el caso del despacho 13, se desaconseja el empleo de este modelo para la predicción. De este modo, **de forma coherente con el estudio previo en el otro despacho, se identifica el intercambio de calor con el terreno como uno de los aspectos a mejorar del modelo.**

Finalmente, en la tabla 5.11 se muestran los valores de los parámetros del modelo estimados para el despacho de becarios durante las condiciones reales de uso. Los datos **confirman la hipótesis de que el coeficiente global de pérdidas a través del suelo depende de su estado de funcionamiento.** De hecho, **la relación encontrada entre los coeficientes de convección del suelo radiante en los dos estados diferenciados es coherente con los**

encontrados en el despacho 13. Por otra parte, **el caudal volumétrico de aire** introducido por la UTA como ventilación mecánica y estimado por el modelo **se desvía menos de un 20%** del valor de diseño de la instalación.

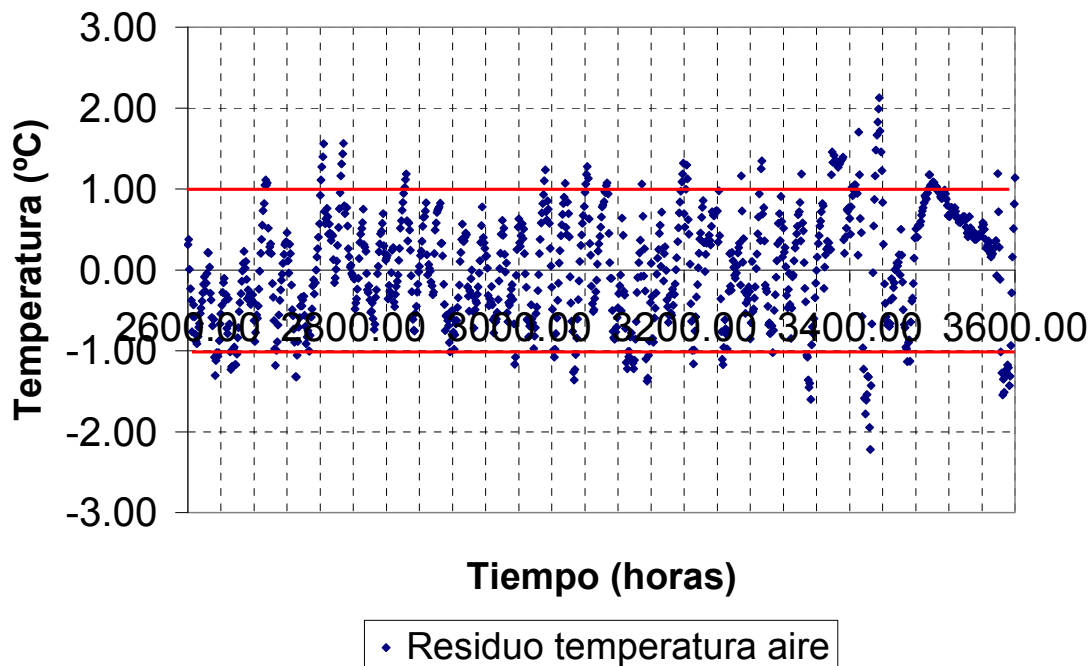


Figura 5.55. Residuos de la temperatura del aire interior del despacho de becarios durante el periodo dominado por la refrigeración.

Parámetro	Ajuste
Coefficiente de pérdidas efectivo Suelo radiante	130.00
Ventilación (UTA) (1/h)	3.29
Intercambio pasillo (1/h)	0.01
Porcentaje de ganancia convectivo	0.32
Convección suelo en funcionamiento (kJ/hm ² K)	19.20
Convección suelo inerte (kJ/hm ² K)	9.02

Tabla 5.11. Valores de los parámetros del modelo estimados para el despacho de becarios durante las condiciones reales de uso.

Así, se puede concluir que **en el despacho de becarios el modelo reproduce los mismos resultados que en el despacho 13.** La mayor incertidumbre asociada a algunos de los parámetros como el caudal volumétrico de aire introducido por el sistema de ventilación mecánica puede explicarse en términos de la influencia relativa de las ganancias internas de calor en concepto de ocupación, no modelizadas aquí. Así, **la medida de la ocupación real en una sala de uso muy diverso como es el despacho de becarios se convierte en una necesidad imperiosa para mejorar la precisión de los parámetros estimados por el modelo.**

En las siguientes líneas se analiza el despacho 1. Este despacho presenta una peculiaridad distinta, dado que tiene un cerramiento adicional expuesto a la irradiancia solar orientado al oeste. Por ello, en la estimación del modelo se varían por separado los parámetros activos del cerramiento orientado a sur y orientado al oeste. En la tabla 5.12. se presentan las estimaciones de los parámetros activos del despacho 1 durante el periodo de evolución libre.

Parámetro	Valor nominal	Ajuste
Poliuretano proyectado conductividad Sur (kJ/hmK)	0.144	0.159
Convección exterior Sur ($\text{kJ/hm}^2\text{K}$)	4.000	9.750
Absortividad exterior Sur	0.400	0.435
Poliuretano proyectado conductividad Oeste (kJ/hmK)	0.144	0.153
Convección exterior Oeste ($\text{kJ/hm}^2\text{K}$)	4.000	9.248
Absortividad exterior Oeste	0.400	0.676
Hormigón suelo conductividad (kJ/hmK)	8.280	0.792
Mortero monocapa capacidad (kJ/hkgK)	1.100	1.085
Poliestireno espesor (m)	0.040	0.007
Convección exterior ($\text{kJ/hm}^2\text{K}$)	3.000	9.806
Absortividad exterior	0.700	0.771
Infiltración (1/h)	0.600	0.306

Tabla 5.12. Estimaciones de los parámetros activos del despacho 1 durante el periodo de evolución libre.

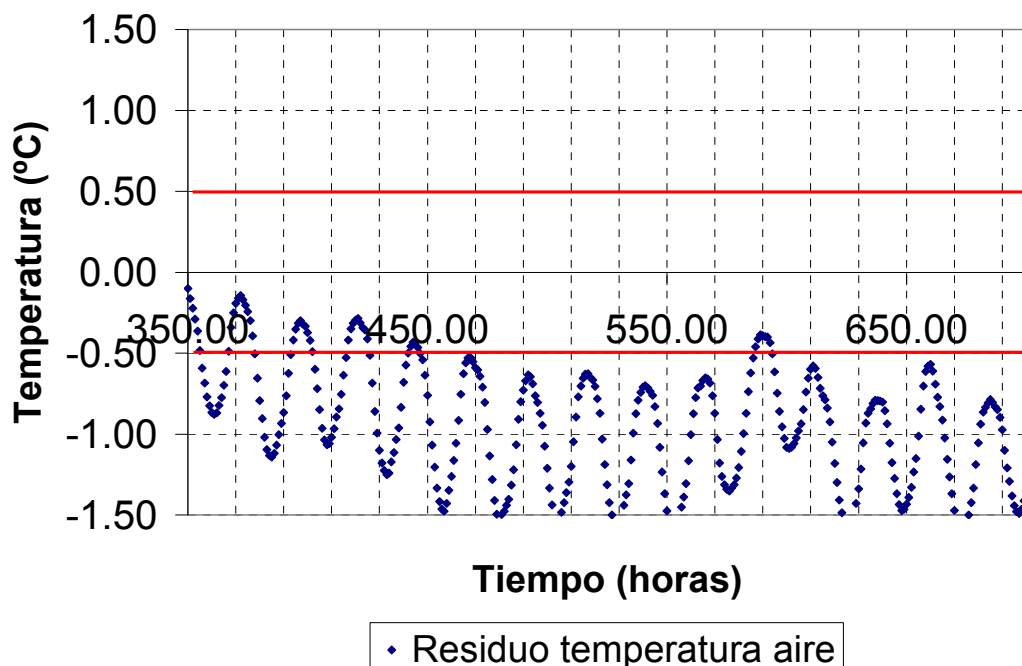


Figura 5.56. Residuos para la temperatura del aire interior del despacho 1 durante la evolución libre.

Se puede observar que **los parámetros estimados se ajustan a los esquemas generales en los que se ha desarrollado el modelo**. La figura 5.56 muestra los residuos para la temperatura del aire interior del despacho 1 durante el periodo de evolución libre. Los **residuos** se encuentran **fuera de la banda de identificación**, lo que invalida el empleo del modelo en

este caso. Este hecho sugiere que **dada la geometría del despacho 1 los fenómenos no lineales de intercambio con el terreno aumentan**, además de que los **efectos bidimensionales del puente térmico pudieran resultar tridimensionales**. Otros efectos como la modelización de la irradiancia solar sobre el cerramiento oeste o la influencia de la velocidad del viento sobre el coeficiente de convección exterior pudieran jugar su papel. En este sentido se habrán de emprender investigaciones futuras.

No obstante, dada la geometría del C-Ddl este despacho resulta un caso aislado con respecto al resto, por lo que se puede concluir que **el modelo es válido para el control predictivo de los despachos del C-Ddl en general, a excepción de los sometidos a condiciones de contorno muy peculiares, como la esquina del mismo y que requieren de un modelo desarrollado ex profeso**.

5.4. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En los siguientes puntos a continuación se resumen los resultados más relevantes de este capítulo:

- Se desarrolla un **nuevo método aplicable al entorno urbano para la caracterización de la reflectancia hemisférica del terreno a partir de series cortas de medidas de irradiancia solar global sobre la vertical y la horizontal**. En el método se introduce una técnica matemática novedosa en el campo de la radición solar (regularización de Tikhonov) y que permite trabajar con datos experimentales altamente correlacionados. Este hecho puede ser de aplicación en un futuro para la resolución del problema inverso en la evaluación energética de edificaciones.
- Se comprueba que la temperatura del terreno a medio metro de profundidad bajo el C-Ddl se encuentra notablemente influida por el intercambio con el propio edificio. Se comprueba que **la medida de la temperatura del terreno se puede ajustar a una solución analítica de la ecuación del calor con una difusividad efectiva**. En el caso bajo estudio se realiza un ajuste a varios años de datos, concluyendo además que **para ajustar un modelo es necesario el conocimiento o bien de la temperatura o bien de la difusividad térmica efectiva del terreno**.
- Se realiza un estudio particular sobre los algoritmos de optimización multiobjetivo más adecuados para el ajuste de los modelos de simulación a los datos experimentales. **Se selecciona e implementa una técnica novedosa en esta disciplina: el algoritmo evolución diferencial, un tipo de algoritmo genético**. Con un ligero esfuerzo adicional, las funciones desarrolladas son susceptibles de ser publicadas como un entorno flexible de ajuste de modelos para el resto de la comunidad.
- Se realiza **el ajuste de los parámetros libres del modelo original**, obteniendo valores fuera del rango de aceptabilidad física, lo que descarta su validez. Se

emplea un **método diagnóstico basado en la física para sugerir la modificación minimal al modelo**, basada en un tratamiento diferente de la radiación solar incidente.

- **El modelo modificado ajusta dentro de la franja de incertidumbre experimental la evolución libre del despacho 13.** Se comprueba que **los resultados del modelo se ajustan a la situación real, prediciendo exitosamente un déficit con respecto al diseño original.**
- Se concluye que **para el despacho 13 y con respecto a la temperatura del aire interior, el nuevo modelo representa de forma efectiva las características del sistema, con valores de los parámetros térmicos dentro de la incertidumbre esperada, sin violar ningún principio físico.**
- Se definen para el modelo la **banda de identificación** de procesos físicos y la **banda de control**. Se demuestra que **bajo determinadas circunstancias un modelo que no discrimina entre algunos procesos físicos se puede emplear de forma efectiva en el ámbito del control.**
- **Se realizan experimentos para cuantificar el efecto de la irradiancia solar directa sobre la temperatura del vidrio.** Se identifica la posibilidad de modelizar dicho efecto, para lo que se requeriría posterior experimentación.
- Tras el ajuste para la serie de 2009 en el despacho 13 y **con la incertidumbre asociada al sistema de control implementado se puede considerar que el modelo representa fielmente el comportamiento térmico del C-DdI durante el periodo de refrigeración. El modelo, asimismo, no cumple con los elevados criterios de calidad exigidos en el caso de la calefacción, lo que sugiere la modificación de la modelización del intercambio de calor con el terreno, de forma consistente con lo anterior.**
- Se demuestra que **el coeficiente de convección del suelo mientras se encuentra en funcionamiento el suelo radiante es muy superior al valor del coeficiente cuando el suelo es inerte.**
- **El valor estimado por el modelo para el caudal de aire introducido por el sistema de ventilación mecánica en el despacho 13 se desvía menos de un 10% del valor nominal de diseño de la instalación.**
- empleando los sensores de concentración de CO₂ en el aire interior del despacho 13, **se estima un valor de renovaciones basado en la caída de la concentración de CO₂ en el aire interior obteniendo un valor de renovaciones por hora igual a 4.06, valor extremadamente cercano al obtenido por el modelo, 4.11.**
- **El modelo obtenido se aplica a la serie temporal de 2010, obteniendo estabilidad y coherencia del modelo**, lo que no siempre está asegurado en el caso de los modelos empíricos.
- Por otra parte, se ajusta **el mismo modelo en el despacho de becarios con la serie de 2009. El despacho de becarios ofrece un resultado totalmente coherente con los**

obtenidos en el despacho 13 para toda la serie de datos: evolución libre, refrigeración y calefacción.

- **Asimismo, dada la geometría del despacho 1 los fenómenos no lineales de intercambio con el terreno se acrecentan, además de que los efectos bidimensionales del puente térmico pudieran resultar tridimensionales.**
- **Como conclusión general se puede extraer: el modelo es válido para el control predictivo de los despachos del C-Ddl en general cuando se encuentran acondicionados por aire, a excepción de los sometidos a condiciones de contorno muy peculiares, como la esquina del mismo y que requieren de un modelo desarrollado ex profeso.**

CAPÍTULO 6. APLICACIONES

6. APLICACIONES

En los capítulos anteriores se ha procedido al ajuste de un modelo, prestando especial atención a los diferentes aspectos relativos a su rango de validez. En este capítulo se aborda la cuestión relativa a las aplicaciones del método, esto es, contestar a la siguiente cuestión: Una vez que se dispone de un modelo de simulación ajustado a los datos experimentales (un modelo de orden elevado en espacio de estados), ¿Qué nuevas posibilidades se obtienen?

Existen numerosas respuestas a la anterior pregunta, en función del objetivo perseguido. En este capítulo se presentan tres grupos de aplicaciones. La primera consiste en la evaluación teórico-experimental mientras que las dos segundas se enmarcan dentro de las técnicas propias del control predictivo.

Un modelo de alto orden ajustado permite ser extrapolado a situaciones distintas y permite un control de sus modificaciones. Así, se puede ejecutar para los mismos supuestos que la evaluación a priori, dando así una idea del impacto relativo real de cada una de las hipótesis introducidas en el modelo original.

Por otra parte, un modelo ajustado de alto orden permite la extracción de la información y su condensación en un modelo de orden reducido. Este tipo de modelos son empleados tradicionalmente en el control de la temperatura interior de edificaciones, aunque no suelen identificarse a partir de primeros principios. En el caso de un modelo de alto orden ajustado a datos experimentales, la estabilidad del modelo de bajo orden queda asegurada, lo que supone un paso importante en control. Esto, unido al desarrollo de las técnicas de pronóstico de las variables meteorológicas conforma el binomio de control predictivo. La segunda parte de este capítulo demuestra cómo se puede obtener un modelo de orden reducido a partir del modelo de simulación ajustado y proporciona un esquema para obtener numéricamente el conjunto de órdenes óptimo del sistema de control, habida cuenta de que se dispone de una predicción meteorológica suficientemente precisa. La novedad de esta técnica está asegurada en la bibliografía (Prívara, 2011), donde una de las aplicaciones pioneras resulta verdaderamente actual.

Finalmente, se presentan dos posibilidades adicionales para emplear un modelo de simulación ajustado a datos experimentales. En primer lugar se destaca la emulación de sistemas, definida como la simulación en tiempo real. En segundo lugar se indica la posibilidad de emplear un modelo de estas características para estudiar la integración de edificios en redes inteligentes. Estos dos ejemplos se presentan como una muestra de la actual actividad internacional en este campo de estudio.

6.1. COMPROBACIÓN TEÓRICO-EXPERIMENTAL

En la comprobación teórico-experimental se analizan dos vías diferentes y complementarias. En primer lugar, se estimará la demanda energética que produce el modelo ajustado con respecto al modelo original empleado bajo los mismos supuestos meteorológicos. Para ello, se desarrolla la solución numérica de las ecuaciones de la evolución temporal de la temperatura

del aire interior en el caso de que ésta sea constante. Esto permitirá verificar el impacto relativo de cada una de las hipótesis introducidas “a priori” en la estimación.

En segundo lugar, se modifican los supuestos del cálculo de la demanda partiendo de las medidas experimentales de la energía aportada a un recinto y disponibles gracias al diseño experimental, con el objetivo de conocer cuál de las hipótesis originales y simplificadoras proporciona resultados más precisos.

6.1.1. SOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES DEL MODELO A TEMPERATURA CONSTANTE

En el capítulo 2 se desarrollaron las ecuaciones diferenciales que rigen la evolución temporal de la temperatura del aire interior dinámica térmica de una edificación, así como el método numérico empleado para resolverlas. Aunque el método es adecuado para la caracterización de la evolución temporal de la temperatura del aire interior de una edificación, es posible establecer una serie de hipótesis simplificadoras cuando se trata de estimar la demanda de energía de una zona determinada. La principal hipótesis simplificadora consiste en considerar los sistemas activos de climatización como fuentes (o sumideros, según el caso) de calor en interacción directa con el nodo que representa la temperatura del aire interior. La salida de un equipo de climatización es función de la temperatura del aire interior de la zona y se muestra esquemáticamente en la figura 6.1. En la figura P_i representa la potencia introducida en la zona i , $P_{max,i}$ el valor absoluto de la máxima potencia a introducir en la zona i y $T_{set,i}$ las temperaturas de consigna para calefacción y refrigeración en la zona i .

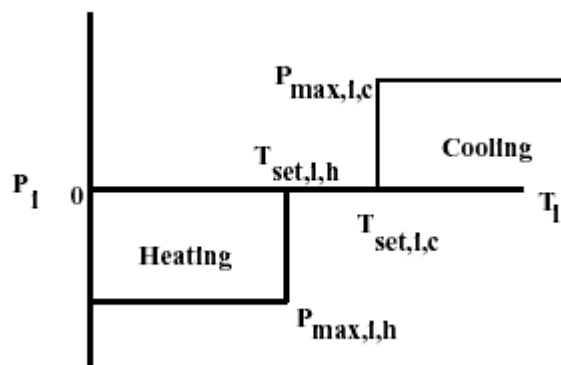


Figura 6.1. Esquema de la hipótesis simplificadora empleada para modelizar los sistemas de climatización activos. Fuente: TRNSYS 16 Mathematical Reference Guide.

Bajo estas hipótesis, el algoritmo para el cálculo de la temperatura del aire interior y su demanda energética asociada se describe a continuación:

- Si la temperatura del aire interior de la zona considerada se encuentra dentro de la banda de confort se resuelven las ecuaciones derivadas para el caso de la evolución libre.

- Si al finalizar el cálculo de la temperatura del aire interior ésta se encuentra fuera de la banda de confort se procede de la siguiente manera:
 - Se calcula la potencia necesaria para que la temperatura final del aire interior de la zona alcance el límite correspondiente de la banda de confort. Se alcanzará el límite superior en el caso de que se necesitara refrigeración y el límite inferior en el caso contrario.
 - En el caso de que la potencia calculada según las especificaciones dadas en el apartado anterior fuese superior a la potencia máxima especificada, se calcula la temperatura del aire interior que resultaría de aplicar la potencia máxima y se vuelve a la situación de evolución libre.

La ecuación de balance energético ahora se puede expresar para cada nodo como:

$$C_i \frac{d}{dt} T_i = \dot{Q}_i - P_i. \text{(ec. 6.1)}$$

Durante cada paso de la simulación las cantidades del miembro derecho de la ecuación 6.1. se consideran constantes y su valor es obtenido considerando la temperatura del aire interior de cada zona como su media aritmética a lo largo del paso de simulación. Tras la sustitución de las expresiones detalladas para los términos de la ganancia de calor se obtiene la expresión:

$$\begin{aligned} \bar{P}_i - \frac{T_{STAR,i}}{R_{STAR,i}} - \sum_{Zonasadyacentes} \sum m_{aco} C_p T_j = & - \left[\frac{1}{R_{STAR,i}} + \left(\dot{m}_{inf,i} + \dot{m}_{v,i} + \sum_{i \rightarrow j} \dot{m}_{aco} + \sum_{contorno} \dot{m}_{aco} \right) C_p \right] \bar{T}_{req,i} - \\ & - \frac{C_i}{\Delta t} (T_{set,i} - T_{\tau-\Delta t}) + m_{inf} C_p T_a + \sum_k^{nvent} m_{v,k,i} C_p T_{v,k} + \dot{Q}_{g,c,i} + \sum_{contorno} \frac{d}{dt} m_{aco} C_p \bar{T}_b \end{aligned} \text{(ec. 6.2)}$$

Esta nueva relación se introduce en la definición de las matrices del modelo para calcular la temperatura interior (ecuaciones 2.37 a 2.40), notando que el vector de temperaturas definido contiene ahora los términos asociados de potencia.

De esta manera se puede estimar la demanda de energía necesaria para mantener unas condiciones de temperatura determinada, con la posibilidad de limitar la potencia de los sistemas de climatización introducidos. Esto posibilita la comparación de la demanda energética de diferentes situaciones. La aplicación al caso del C-Ddl y los valores concretos introducidos en la simulación se detallan en la siguiente sección.

6.1.2. INFLUENCIA DE CADA UNO DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO

Como se ha mencionado en el tercero de los capítulos de este trabajo de investigación el C-Ddl fue simulado tomando una serie de aproximaciones previas a su construcción. Una vez

monitorizado y con un modelo ajustado se puede evaluar la influencia de cada una de esas aproximaciones por separado, así como del conjunto de ellas.

Para ello, se emplea el modelo de simulación del despacho 13, considerado representativo de la demanda, junto a los datos meteorológicos empleados en la simulación original. En primer lugar se toman las hipótesis originales de simulación, sustituyéndose una a una por los valores obtenidos experimentalmente y, cambiando las partes del modelo necesarias en los casos en los que procede. Con el objetivo de mantener una base de comparación constante, se ha supuesto que el C-Ddl se encuentra ocupado y con ganancias internas según se presentan en el capítulo dos. De ese modo, aunque la modelización de las ganancias internas puede resultar alejada de la realidad, sirve como base de comparación de la influencia relativa de cada uno de los diferentes aspectos que se han modelizado.

El caso original (caso base) se compara con los resultados obtenidos introduciendo modificaciones derivadas de los ajustes realizados en el capítulo 5. Las modificaciones consideradas son las siguientes:

- Caso base. Modelo de simulación empleado en la evaluación energética original, sin la introducción del efecto de sombreado producido por la pérgola diseñada.
- Caso 1. Introducción de la reflectancia hemisférica real del terreno y el resto de la hipótesis iguales a las consideradas en el caso base.
- Caso 2. Introducción de la tasa del intercambio de aire en concepto de infiltraciones y el resto de la hipótesis iguales a las consideradas en el caso base.
- Caso 3. Introducción de la tasa del intercambio de calor con el terreno y el resto de la hipótesis iguales a las consideradas en el caso base. En este caso, para la modificación del modelo se requieren dos consideraciones. En primer lugar los parámetros ajustados para el componente constructivo en contacto con el terreno que se toman igual a los obtenidos del ajuste a los datos experimentales en el capítulo 5. En segundo lugar se introduce como temperatura del terreno bajo el edificio la ajustada según la relación 5.11. a las medidas experimentales obtenidas del sensor situado bajo el despacho 4 y localizado a un metro de profundidad.
- Caso 4. Introducción de los parámetros obtenidos conjuntamente para el cerramiento en contacto con el aire: fachada y cubierta. El resto de las hipótesis se consideran iguales a las del caso base.
- Caso total. Introducción simultánea de las hipótesis consideradas en los casos 1 a 4 descritos anteriormente.

El año se ha dividido en dos periodos correspondientes a la demanda de calefacción y a la de refrigeración. La demanda de calefacción se ha considerado para los meses de octubre a mayo, ambos inclusive. La demanda de refrigeración se ha considerado para el periodo complementario al anterior, esto es, los meses de junio a septiembre, ambos inclusive. Para el cálculo de la demanda de calefacción se han ejecutado las simulaciones con una temperatura de consigna constante e igual a 20 °C y luego se han sumado solamente las contribuciones

energéticas durante el periodo de ocupación. De manera análoga para el cálculo de la demanda de refrigeración se han ejecutado las simulaciones con una temperatura de consigna constante e igual a 26 °C y luego se han sumado solamente las contribuciones energéticas durante el periodo de ocupación. La contribución anual se ha dividido por los metros cuadrados de la planta del despacho, ofreciendo un valor final de la demanda anual expresado en Watios-hora por metro cuadrado y año. La tabla 6.1 presenta los resultados para calefacción, refrigeración y totales (suma de calefacción y refrigeración) para los casos presentados anteriormente. La figura 6.2 presenta los mismos resultados de forma gráfica.

Caso	Calefacción	Refrigeración	Total
Base	844.88	4467.34	5312.23
1	881.53	4097.91	4979.45
2	130.07	2962.14	3092.22
3	3032.82	9948.18	12981.00
4	786.73	4496.02	5282.74
Total	1177.18	8307.42	9484.60

Tabla 6.1. Demanda energética, expresada en Wh/m²año para los diferentes casos del despacho 13.

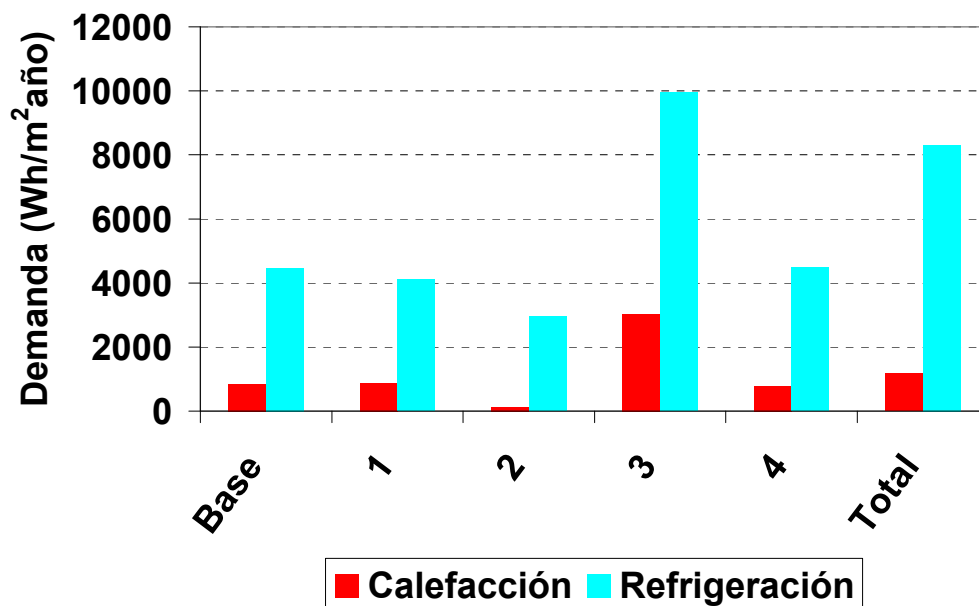


Figura 6.2. Representación gráfica de las demandas de refrigeración y de calefacción para los diferentes casos.

La demanda energética total del despacho seleccionado para el caso base asciende aproximadamente a 5.3 Kwh/m²año, lo que se considera en la actualidad un edificio de baja demanda energética. Como en las simulaciones correspondientes al caso base no se ha considerado el efecto del sombreado producido por la pérgola, es esperable que el efecto

de un sombreado sobre la cubierta disminuya la demanda de refrigeración, que quintuplica las referidas a las de calefacción.

En la tabla 6.2 se presentan los mismos resultados en la forma de porcentajes de variación con respecto al caso base.

Caso	Calefacción (%)	Refrigeración (%)	Total(%)
Base	100.00	100.00	100.00
1	104.34	91.73	93.74
2	15.40	66.31	58.21
3	358.96	222.69	244.36
4	93.12	100.64	99.44
Total	139.33	185.96	178.54

Tabla 6.2. Porcentajes de variación con respecto al caso base de los diferentes casos considerados.

Se puede observar que **el valor real de la reflectancia hemisférica del terreno** aumenta la demanda de calefacción y reduce la de refrigeración. El efecto es lógico, puesto que el valor real de la reflectancia es inferior al estimado originalmente, por lo que la irradiancia solar global sobre la vertical real es menor que la estimada. De hecho, **supone una variación aproximada de un 5% de la demanda energética de calefacción y de un 10% de la de refrigeración**. Debido al mencionado efecto sobre la vertical, **es de esperar que en edificios de varias plantas este efecto se vea acrecentado**.

La tasa de renovaciones de aire en concepto de infiltración ha sido sobrestimada en la evaluación “a priori”, y su reducción conlleva la reducción tanto de la demanda de calefacción como la de refrigeración. **La reducción de la demanda en este concepto asciende aproximadamente a un 85% en calefacción y superior al 30% en refrigeración,** que se convierten en un **40% del valor global**.

La influencia de la modelización del intercambio de calor con el terreno bajo el C-Ddl es, junto con la tasa de infiltraciones, la que proporciona un valor mayor. La **variación de la demanda** de energía en concepto de calefacción es **superior al 250%** y en refrigeración **aumenta más del 100 %**, convirtiéndose en un **aumento global cercano al 150%**. La interpretación física de este hecho es que los edificios de una sola planta presentan un elevado porcentaje de su superficie delimitante en contacto con el terreno. De hecho, **se constata que la suposición que la temperatura del terreno bajo el C-Ddl es una constante ofrece resultados muy alejados de la realidad**.

Con respecto al modelo efectivo de cubierta y de fachada (caso 4), se observa que la demanda de calefacción disminuye mientras que aumenta la de refrigeración. **El efecto del puente térmico disminuye la demanda de calefacción algo menos de un 10% y aumenta la de refrigeración muy ligeramente**. De hecho, el efecto sobre la demanda global es ligeramente

positivo. No obstante, y pese a que en esta situación concreta el efecto global ha sido beneficioso, se deben evitar los puentes térmicos en la construcción en la medida de lo posible. Finalmente, cuando se aplican todos los cambios simultáneamente al modelo se observa que **el modelo empleado en la evaluación previa del C-Ddl infraestimó la demanda energética tanto en concepto de calefacción como en el de refrigeración. De hecho, el aumento de la demanda de calefacción del modelo ajustado con respecto al original es cercano al 40%, en refrigeración cercano al 100% y en total en torno a un 90%.**

Estas comparaciones se han realizado teniendo en cuenta una serie de hipótesis del modelo y resultan útiles desde el punto de vista de la modelización futura. Sin embargo, no han sido comparadas con las medidas reales de aporte energético. En la sección siguiente se abordan algunos de los aspectos relativos a dicha comparación.

6.1.3. COMPARACIÓN CON LOS DATOS EXPERIMENTALES

En un sentido estricto, la relación entre el aporte energético necesario para alcanzar el confort térmico en el interior de una edificación, sus características constructivas y las excitaciones internas y externas que le afectan requiere de un modelo detallado y ajustado tal y como se ha descrito en el capítulo anterior. No obstante, el cálculo de la demanda previa a la construcción de una edificación sigue siendo un problema vigente y, al igual que tiene sentido evaluar la influencia de los diferentes parámetros y modelizaciones sobre la estimación teórica de la demanda energética, tiene mucho más sentido evaluar el desfase existente entre la demanda calculada teóricamente y la medida experimentalmente para poder conocer de verdad cuál es el comportamiento energético de un edificio en condiciones reales de uso.

Para ello, en el caso analizado en esta investigación, se han tomado los datos meteorológicos correspondientes a la serie temporal de 2010 y se han aplicado al modelo ajustado del despacho 13. En esta ocasión se ha empleado la hipótesis de temperatura del aire interior constante (ecuaciones 6.1 y 6.2) para la comparación con los datos obtenidos experimentalmente.

Para la estimación de la demanda energética experimental en condiciones reales de uso se estima a partir de medidas experimentales la potencia introducida en el suelo radiante y se multiplica por el tiempo de funcionamiento. La potencia introducida se obtiene a través de las medidas de las temperaturas de impulsión y de retorno del agua del circuito multiplicadas por el caudal nominal del circuito siempre que la válvula de dos vías se encuentre abierta. Por otra parte, la demanda teórica se estima con la hipótesis de que el despacho se encuentra ocupado de forma constante con dos personas (200W de calor sensible), dos ordenadores personales (280 W de calor sensible) y una tasa de iluminación de 5 W/m^2 , con un 40% de disipación convectiva y con el horario supuesto durante la estimación de la demanda teórica. Para la comparación de la demanda teórica con la obtenida experimentalmente, está se considera solamente cuando el sistema real se encuentra en funcionamiento, esto es, cuando la válvula de dos vías, que permite la introducción de calor en el suelo, se encuentra en funcionamiento.

Como se ha comentado con anterioridad, con este tipo de aproximaciones no es de esperar que se respete el comportamiento dinámico del sistema. No obstante, la aproximación considerada en media para todo el periodo bajo estudio, puede ofrecer algunos datos relevantes sobre la validez de la aproximación del cálculo de demanda. La tabla 6.3 presenta los valores obtenidos mediante la estimación experimental (Exp) y las estimaciones mediante diferentes hipótesis teóricas (Teórico 1, 2, 3 y 4).

Caso	Demanda total (kWh/m ²)
Exp	20.83
Teórico 1	0.11
Teórico 2	12.80
Teórico 3	20.65
Teórico 4	1.11

Tabla 6.3. Estimaciones experimentales y teóricas de la demanda energética de calefacción para el despacho 13 y la serie temporal de 2010.

En primer lugar se ha estimado la demanda energética en concepto de calefacción con una temperatura de consigna igual a 20 °C y las hipótesis consideradas para el caso base descrito en la sección anterior (Teórico 1. Modelo de simulación empleado en la evaluación energética original, sin la introducción del efecto de sombreado producido por la pérgola diseñada). En tal caso la demanda obtenida presenta un valor particularmente bajo, a varios órdenes de magnitud de distancia. Este hecho revela que hay términos que introducen una mayor demanda y no han sido considerados. Es conveniente destacar en este punto que en el modelo original para la estimación de la demanda no se había introducido un término correspondiente a la ventilación. Sin embargo, en condiciones reales de uso la ventilación mecánica se encuentra en funcionamiento. Por ello, se introduce un término de ventilación en el modelo con una tasa de renovaciones del aire iguales a las estimadas para el modelo en el capítulo anterior (Teórico 2). La estimación de la demanda con estas hipótesis alcanza el orden de magnitud de la estimación experimental, aunque aún presenta diferencias significativas. Dichas diferencias pueden deberse a la operación del C-DdI, que se alejen de los supuestos teóricos. De hecho, un análisis de la serie de temperaturas del aire interior del despacho da como resultado el que las temperaturas de confort del despacho durante el periodo de ocupación oscilan, dependiendo de los días considerados, entre 21 y 23 °C. Por ello, al modelo con la ventilación mecánica introducida se le ajusta la temperatura de consigna a 22 °C (Teórico 3), se vuelve a estimar la demanda y se observa un notable acuerdo en media. Para discriminar el efecto de la temperatura de consigna y del término de ventilación mecánica introducido se estima la demanda nuevamente con la temperatura de consigna igual a 22 °C pero sin el término de ventilación mecánica (Teórico 4). En este caso la estimación queda fuera por más de un orden

de magnitud, por lo que en este caso la influencia del término de ventilación mecánica resulta mucho más relevante para el cálculo de la demanda que la temperatura de consigna.

Así, **con las hipótesis de partida del modelo la estimación de la demanda se encuentra lejos del valor experimental en condiciones reales de uso**. Aunque las hipótesis del modelo respecto a las ganancias internas y la aproximación empleada para el cálculo de la demanda pueden resultar crudas, los valores en media para todo el periodo pueden informar de la situación. De hecho, **se debe ajustar la temperatura de consigna a valores cercanos a las condiciones reales de uso e introducir un término de ventilación mecánica, siendo éste último término el dominante en el cálculo de la demanda**.

6.2. DESARROLLO DE UN MODELO DE ORDEN REDUCIDO Y SUS APLICACIONES AL CONTROL PREDICTIVO

Una vez que se dispone de un modelo térmico de alto orden para un edificio unas de las principales aplicaciones consiste en aplicarlo al control de su temperatura del aire interior. El control térmico de los edificios ha recibido mucha menos atención que otros campos de aplicación como es el aeroespacial, petroquímico, electrónico o automovilístico. Uno de los motivos para esto es que en estos campos de aplicación un error en el algoritmo de control produce fallos fácilmente detectables. Por el contrario en el control térmico de edificios los efectos de un control deficiente no son manifiestos. Por ejemplo, una válvula defectuosa en un radiador seguirá haciendo su trabajo y se obtendrá confort térmico en el interior a costa de un mayor consumo energético. De este modo los edificios despilfarran grandes cantidades de energía debido a fallos en su control no fácilmente detectables y por tanto hay un enorme potencial de ahorrar energía mejorando este aspecto.

Habitualmente los controladores en los sistemas de mantenimiento energético de edificios tienen el confort térmico como único objetivo (habitualmente expresado como la temperatura de consigna). La reducción del consumo energético no es una prioridad en el diseño de los controladores en temperatura. Una solución prometedora para mejorar los sistemas de mantenimiento energético de edificios es el denominado Control Predictivo basado en Modelo (Model Predictive Control, MPC). MPC implementa varias características que lo hacen adecuado para los edificios que se acondicionan de forma intermitente. En primer lugar es capaz de gestionar patrones de ocupación y pronósticos meteorológicos para optimizar el control en temperatura. En segundo lugar MPC puede aplicar criterios de optimización multiobjetivo, en el caso de un edificio establece un balance entre el confort térmico y el consumo de energía necesario para alcanzarlo. Por último MPC es capaz de incorporar de forma implícita las ligaduras asociadas con sistemas multientrada-multisalida. De hecho, se ha demostrado teóricamente que MPC obtiene mejores resultados comparado con otros algoritmos de control (Kummert, 2000).

La aplicación de MPC requiere de un conocimiento detallado del efecto de cada una de las excitaciones posibles sobre la evolución temporal del sistema. Aunque las bases de la modelización e identificación de sistemas están bien establecidas, su aplicación en el ámbito

de la edificación aún reviste cierta dificultad debido, por una parte, a las incertidumbres asociadas a las medidas de las variables no relevantes y, por otra parte, a la carencia de una estructura de modelo generalizada y aceptada por la comunidad. De forma general se prefieren modelos de bajo orden para el control y en especial para MPC, debido principalmente a los requerimientos en tiempo de cálculo y a los controladores empleados de forma habitual. Sin embargo, un modelo típico de un edificio obtenido por discretización espacial de las ecuaciones de transferencia del calor implica miles de ecuaciones e incluye no linealidades. Las técnicas de reducción del orden del modelo han sido empleadas con éxito en el pasado pero presentan algunos inconvenientes: linealización en torno del punto de operación e invarianza temporal de los parámetros asociados al sistema. Una alternativa es obtener modelos empíricos de caja negra, tales como ARMAX, BJ, Redes neuronales, etc., lo que ha sido demostrado que no captura bien las no linealidades del sistema. Es más en muchas de estas aproximaciones aparecen parámetros de una significada relevancia estadística que en ocasiones no disponen de interpretación física e incluso contradicen algunos de sus principios cuando son observados en detalle. A este respecto, por ejemplo, en trabajos recientes (Mejri, 2011) se ha demostrado que al identificar un modelo en función de transferencia pueden aparecer polos complejos conjugados, lo que contradice la hipótesis de simetría del intercambio de calor. Para evitar este fenómeno se emplean modelos de parámetros acoplados, donde la estructura del modelo se postula a partir de los fenómenos físicos implicados y sus parámetros se identifican empíricamente. Sin embargo, para llevar a cabo esta tarea se requiere de series temporales de las variables de interés medidas con alta calidad y que cubran todo el rango de frecuencias de excitación del sistema. Como se ha comentado anteriormente son particularmente difíciles de encontrar y en el caso que nos ocupa (condiciones reales de uso) la habitabilidad interior impide la excitación de algunos de los modos más relevantes del sistema. Otro problema asociado es que los edificios habitados contienen una serie de perturbaciones debido a los usuarios que son difícilmente medibles y mucho menos controlables.

Como se ha demostrado en el capítulo anterior un modelo de alto orden basado una formulación numérica de los fenómenos de transferencia de calor puede ser ajustado dentro de los criterios de incertidumbre experimental a la evolución libre del sistema. Cuando este modelo ha sido aplicado a las condiciones reales de uso el error cometido ha superado la incertidumbre del sistema de medida, aunque el error cometido es acotado en banda e inferior a la incertidumbre habitual de un sistema de control. Por ello un modelo de alto orden en simulación es adecuado para identificar un modelo de bajo orden basado en principios físicos. Una de las ventajas, por ejemplo con respecto al objeto real, es la posibilidad de introducir secuencias de excitación binarias pseudoaleatorias con un control total de las perturbaciones asociadas al sistema.

En lo que sigue se identificará en primer lugar un modelo de bajo orden adecuado para la representación en control del sistema. Acto seguido se emplearán técnicas de identificación de sistemas para ajustar sus parámetros. Una vez obtenido este modelo reducido se mostrará que el problema MPC se puede formular en términos matemáticos como un problema de

programación lineal. En este esquema es posible obtener la secuencia de control óptima multiobjetivo.

6.2.1. MODELO DE ORDEN REDUCIDO PARA EL C-DdI

Para formular un modelo de orden reducido para el C-DdI se emplean las simplificaciones habituales en cuanto a la distribución espacial y temporal de las propiedades termofísicas, considerándose constantes. Los modelos derivados de los principios físicos se representan de forma natural en el espacio de estados mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden. De hecho, la formulación del MPC mostrada más adelante emplea el modelo del sistema en espacio de estados.

Es habitual que los modelos de bajo orden que se emplean con propósitos de control térmico en edificaciones se deriven de representaciones de redes lineales de parámetros acoplados (Coley, 1996; Kummert, 2001; Ghiaus, 2010; Madsen, 1995; Wang, 2006). La envolvente se suele representar mediante redes 2R-C o incluso 3R-2C (Gouda, 2002). La cubierta y la solera se modelizan como un elemento más de la envolvente mediante el mismo tipo de redes y la masa térmica interna mediante una capacidad. Dado que las ventanas no acumulan energía se representan como simples resistencias, al igual que los términos de ventilación e infiltración.

En el caso que nos ocupa, se representa mediante una red 2R-C la envolvente en contacto con el aire y por separado y con la misma red la que se encuentra en contacto con el terreno. El intercambio convectivo es representado por una resistencia constante adicional entre la envolvente y la temperatura del aire. La infiltración se representa por otra resistencia adicional. El intercambio radiativo de onda larga se considera linealizado con respecto a la temperatura del cielo. En este contexto, las entradas del modelo son la temperatura del aire exterior, la radiación solar incidente sobre las diferentes partes de la envolvente, la temperatura del terreno bajo el C-DdI, la temperatura de impulsión del sistema mecánico de ventilación y la temperatura aparente de la bóveda celeste. La salida del modelo se escoge como la temperatura del aire interior, sobre la que influyen las diferentes entradas del modelo.

Con estas consideraciones, se puede escribir un sistema de la forma:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + B_1 u + B_2 w \\ y &= Cx + D_1 u + D_2 w, \text{ (ec. 6.3)}\end{aligned}$$

Donde x es el vector de estados, y es el vector salida del modelo (temperatura del aire interior), w es el vector de entradas medibles del sistema (temperatura del aire exterior, Irradiancia Solar Global, temperatura del terreno bajo el C-DdI y temperatura aparente de la bóveda celeste) y u es el vector de entradas controlables del sistema (la temperatura de impulsión a la salida del inductor del sistema de la ventilación mecánica). Las matrices A , B_1 , B_2 , C , D_1 y D_2 se construyen del mismo modo que aparece en la literatura (Hazyuk, 2012). Concretamente:

$$x = [T_w \quad T_A \quad T_s]^T, \text{ (ec. 6.4)}$$

$$y = T_A, \text{ (ec. 6.5)}$$

$$w = [T_{ext} \quad A_{cub} G_h + A_w G_v \quad T_g \quad T_{cielo}], \text{ (ec. 6.6)}$$

$$u = T_{ind}, \text{ (ec. 6.7)}$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C_w} & \frac{1}{R_2 C_w} & 0 \\ \frac{1}{R_2 C_A} & -\frac{R_v + R_2 + R_3}{R_v R_2 R_3 C_A} & \frac{1}{R_3 C_w} \\ 0 & \frac{1}{R_3 C_s} & -\frac{2R_3 + R_s}{R_3 R_s C_s} \end{bmatrix}, \text{ (ec. 6.7)}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ C_A \\ 0 \end{bmatrix}, \text{ (ec. 6.8)}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1 C_w} & 0 & \frac{R_{co}}{R_1 C_w} & R_{cielo} \\ \frac{1}{R_v C_A} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{R_s C_s} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{ (ec. 6.9)}$$

$$C = [0 \quad 1 \quad 0], \text{ (ec. 6.10)}$$

$$D_1 = 0; \text{ (ec. 6.11)}$$

$$D_2 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0], \text{ (ec. 6.12)}$$

Aunque la representación en espacio de estados resulta adecuada para la derivación de modelos basados en los fenómenos físicos de transferencia de calor implicados, el análisis y la identificación es preferible realizarlo en la representación en función de transferencia, como se ha comentado previamente en el capítulo 2. El modelo expresado en función de transferencia se obtiene mediante la transformada de Laplace del sistema en espacio de estados:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} \equiv H(s) = C(sI - A)^{-1} B + D, \text{ (ec. 6.13)}$$

Donde s representa la variable compleja asociada. Tras aplicar la anterior transformación al modelo en espacio de estados se obtienen cinco funciones de transferencia a identificar, a saber:

$$H(z^{-1}) \equiv \begin{bmatrix} \frac{T_A(z^{-1})}{T_{ext}(z^{-1})} \\ \frac{T_A(z^{-1})}{G_h + G_v(z^{-1})} \\ \frac{T_A(z^{-1})}{T_g(z^{-1})} \\ \frac{T_A(z^{-1})}{T_{cielo}(z^{-1})} \\ \frac{T_A(z^{-1})}{T_{imp}(z^{-1})} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} o(2) \\ o(3) \\ o(1) \\ o(3) \\ o(1) \\ o(3) \\ o(2) \\ o(3) \end{bmatrix}, \text{ (ec. 6.14)}$$

Donde $O(n)$ representa un polinomio de orden n en la variable z^{-1} , correspondiente a la discretización del modelo continuo. Así, **el orden del modelo reducido a identificar en función de transferencia queda determinado explícitamente por la aproximación física tomada**. Es más, la estabilidad del modelo queda asegurada en este esquema, puesto que el modelo reducido proviene de un modelo de alto orden basado en los principios físicos de transferencia del calor.

En este punto los coeficientes del modelo de orden reducido deben estimarse con un método adecuado, así como evaluar su validez, lo que se aborda en la siguiente sección.

6.2.2. IDENTIFICACIÓN DEL MODELO MEDIANTE SIMULACIONES AJUSTADAS

Como se ha comentado en la sección anterior, una vez que el modelo para la evolución temporal de la temperatura del aire interior ha sido postulado existen muchas maneras de representarlo matemáticamente. Las dos principales son el espacio de estados y la función de transferencia. Los modelos en espacio de estados ofrecen la ventaja de que todos sus parámetros son directamente interpretables físicamente. Sin embargo desde el punto de vista de la identificación de los sistemas estos no son únicos. Los modelos en función de transferencia, por otro lado, presentan una difícil interpretación física, pero satisfacen unicidad en identificación. La transformada de Laplace, en el caso de los sistemas en tiempo continuo, y la transformada Z, en el caso de los sistemas en tiempo discreto, relacionan ambas formulaciones. En este trabajo se postula un modelo en espacio de estados proveniente de un modelo de alto orden basado en los fenómenos físicos asociados a la transferencia de calor y para evitar ambigüedades se identifica en función de transferencia. Resulta conveniente destacar en este punto la tendencia del analista a aumentar el orden del modelo en estimación, obteniendo de ese modo un mejor ajuste estadístico, y su consiguiente estabilidad. El esquema aquí seguido previene de esta técnica. **El modelo a identificar tiene una estructura prefijada y su estabilidad debe ser predicha por las leyes de la física**. En caso contrario habría que proceder a rehacer el esquema desde el principio.

La elección de un esquema de identificación no es un asunto baladí y al que hay que prestar la debida atención. Los métodos grafoanalíticos (respuesta en pulso y respuesta a paso) no son de aplicación en nuestro caso, ya que los modelos de edificios pueden contener ceros (Ghiaus, 2010). Este hecho impide la estimación no paramétrica de modelos, debiendo adoptarse un esquema paramétrico de identificación. Los algoritmos de identificación básicos son los de búsqueda iterativa de mínimo y mínimos cuadrados. Los primeros se emplean habitualmente en la identificación de parámetros de edificaciones existentes a partir de modelos lineales (Mejri, 2011). Como en este caso se postulan relaciones no lineales entre los parámetros se corre el riesgo de que el algoritmo no converja, por lo que se emplea mínimos cuadrados.

Con respecto a la caracterización de las variables de entrada del modelo se han empleado los datos meteorológicos de la localización utilizados en la estimación teórica previa del modelo, a los que se ha sumado una variable endógena de control, que es el sistema de ventilación mecánica, que consiste en una secuencia de pulsos pseudoaleatorios de amplitud temporal de seis horas.

La medida de la bondad del ajuste se realiza mediante la cantidad:

$$ajuste = \left(1 - \frac{\|\hat{y} - y\|}{\|\hat{y} - \bar{y}\|} \right), \text{ (ec. 6.15)}$$

Que ofrece un tanto por uno del ajuste. Mientras más cercano a uno es el ajuste, mejor se puede considerar, siendo la unidad el ajuste perfecto. Con este esquema, se realiza un ajuste para el periodo de verano (puesto que se ha tomado la ventilación mecánica como la variable endógena de control y se sabe de los estudios anteriores que el modelo representa la realidad mejor en este caso), conteniendo 1500 horas y reservando otras 300 horas como periodo de validación. El ajuste ofrece un valor de 0.81 y se obtienen las funciones de transferencia:

$$H(z^{-1}) \equiv \begin{bmatrix} \frac{0.02738 z^{-1} - 0.03013 z^{-2} + 0.002377z^{-3}}{1 - 1.07 z^{-1} - 0.1674 z^{-2} + 0.2386z^{-3}} \\ \frac{2.077 \cdot 10^{-5} z^{-1} + 2.022 \cdot 10^{-5} z^{-2}}{1 + 0.8115 z^{-1} - 0.9948z^{-2} - 0.8089 z^{-3}} \\ \frac{1.237 z^{-1} - 1.134 z^{-2}}{1 - 0.8066 z^{-1} - 0.5232 z^{-2} + 0.3981 z^{-3}} \\ \frac{0.0001264 z^{-1} - 0.0001252 z^{-2}}{1 - 2.892 z^{-1} + 2.786z^{-2} - 0.8944 z^{-3}} \\ \frac{0.09931 z^{-1} - 0.04335 z^{-2} - 0.05227 z^{-3}}{1 - 0.3236 z^{-1} - 0.5242 z^{-2} - 0.1463 z^{-3}} \end{bmatrix}, \text{ (ec. 6.16)}$$

Como comprobación de la estabilidad del sistema dinámico estimado de bajo orden se presenta el diagrama de ceros y polos. Como se ha comentado anteriormente, este requisito se debe cumplir por las restricciones físicas impuestas, quedando todos los polos dentro del círculo unidad en el plano complejo. En la figura 6.3 se presenta el diagrama de ceros y polos para el modelo identificado. Se comprueba, efectivamente, que todos los polos del sistema se encuentran dentro del círculo unidad, asegurando la estabilidad del modelo.

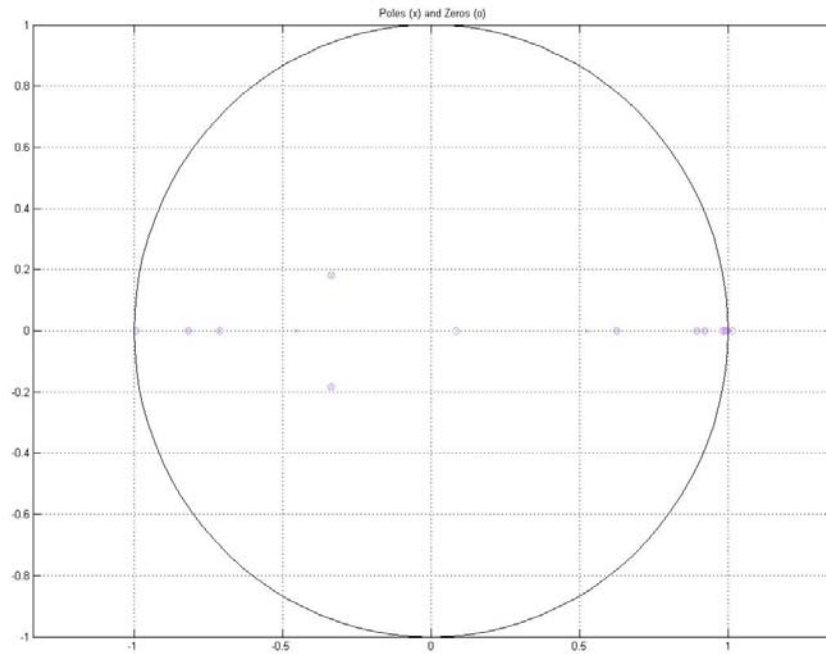


Figura 6.3. Diagrama de ceros y polos para el modelo de orden reducido identificado para la primera de las entradas del modelo. Se puede observar que todos los puntos caen dentro del círculo unidad, asegurando la estabilidad del modelo estimado.

Otra de las comprobaciones que se debe hacer es que la respuesta a escalón es asintóticamente estable, lo que se presenta en la figura 6.4. para cada una de las entradas del modelo. Se puede observar que la salida tiende asintóticamente a un valor constante para cada escalón introducido.

Así, **se demuestra que es posible la identificación de los parámetros asociados a un modelo de orden reducido, para lo que se emplea una secuencia de datos sintéticos producida a partir del modelo ajustado experimentalmente en el capítulo 5.** Asimismo, se comprueba numéricamente la estabilidad del modelo de bajo orden, lo que lo hace adecuado para su uso en el control predictivo del C-DdI.

En la siguiente sección se propone un esquema numérico para emplear estos resultados en un esquema de control predictivo.

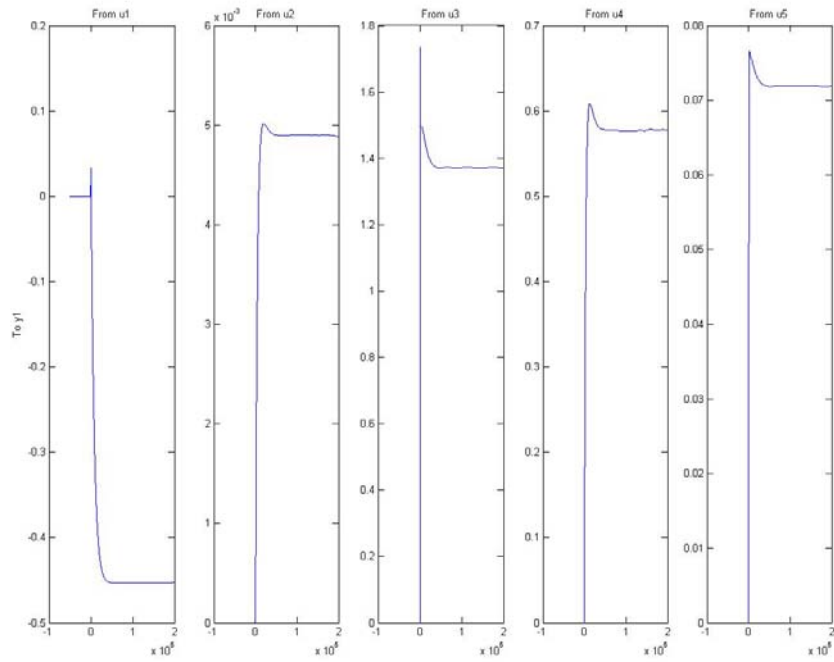


Figura 6.4. Respuesta a escalón del modelo de orden reducido identificado a partir del modelo ajustado.

6.2.3. EMPLEO DEL MODELO DE ORDEN REDUCIDO EN CONTROL PREDICTIVO

En esta sección se describe cómo se puede emplear el modelo identificado para emplearlo en un esquema de MPC. Para ello, se deben dar dos pasos: en primer lugar definir una función de coste a minimizar (una función escalar definida a partir de las variables del sistema y que representa el objetivo que se pretende optimizar como, por ejemplo, la energía empleada en el acondicionamiento del aire interior) y en segundo lugar introducir el modelo en un esquema numérico adecuado para el cálculo de las órdenes del sistema de control que aseguren el objetivo.

En lo que sigue se creará el esquema numérico para el caso de calefacción, siguiendo un esquema presentado recientemente en la literatura (Hazyuk 2012b). El caso de refrigeración implica, sencillamente, un cambio de variables para que se respete el orden de las desigualdades.

6.2.3.1. FUNCIÓN ENERGÉTICA DE COSTE MÍNIMO

Para sistemas térmicos que tienen un flujo de calor como entrada, $u(t)$, la minimización de la energía requerida durante N_u unidades de tiempo (denominado horizonte de control) se puede expresar mediante el mínimo de la función:

$$J_e(t_k) = \sum_{i=1}^{N_u} u(t_k + i), \text{ (ec. 6.16)}$$

Junto a su restricción durante el periodo de calefacción:

$$0 \leq u(t_k + i) \leq u_{\max}, \forall i = 1, \dots, N_u, \text{ (ec. 6.17)}$$

Además, para asegurar el confort térmico, se deben introducir ligaduras adicionales en la predicción de la salida del modelo:

$$\hat{y}(t_k + i | t_k) \geq T_{\min}(t_k + i), \forall i = 1, \dots, N_y, \text{ (ec. 6.18)}$$

Donde T_{\min} es la temperatura correspondiente al límite inferior de confort y N_y el horizonte de predicción. Bajo esta aproximación se asume que el valor máximo de la energía, u_{\max} , es lo suficientemente grande como para alcanzar, al menos, el límite de confort térmico. En esta formulación es posible que el horizonte de control sea inferior al horizonte de predicción, por lo que los incrementos en la señal de control serán nulos durante ese periodo, esto es, entre $t_k + N_u$ y $t_k + N_y$ la señal de control permanecerá constante. Bajo estas condiciones, puede resultar imposible mantener el confort térmico durante este intervalo junto a la minimización de la función objetivo. Por ello, en lo que sigue se supondrán iguales los horizontes de control y de predicción, esto es, $N_u = N_y$. Así, **queda definida una función de coste que incluye iguales horizontes de predicción y de control, los costes energéticos y las ligaduras correspondientes al confort térmico.**

Una vez definida la función de coste a minimizar y las ligaduras asociadas a ella para introducir el confort térmico, se presenta en la siguiente sección el esquema numérico para obtener la secuencia de control óptima.

6.2.3.2. SOLUCIÓN DE MPC MEDIANTE PROGRAMACIÓN LINEAL

Una vez que se ha definido la función de coste, el problema se reduce a encontrar una secuencia de comandos que la minimice respetando las ligaduras. Dado que el problema presentado es lineal y sujeto a ligaduras también lineales, se trata de un problema de optimización lineal. Dichos problemas se pueden resolver dentro del marco del método conocido como Programación Lineal (PL). Para hacer esto, se debe expresar el problema de control en la forma canónica de PL:

Minimizar: $\mathbf{c}^T \mathbf{z}$

Sujeto a: $\mathbf{Mz} \leq \mathbf{b}$,

Donde \mathbf{z} representa el vector de variables, \mathbf{c} y \mathbf{b} son vectores de coeficientes conocidos y \mathbf{M} es una matriz de coeficientes conocidos.

Para formular el problema de optimización de la función de coste en la forma canónica de LP se parte del sistema a controlar, expresado en tiempo discreto y espacio de estados:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B_1u(k) + B_2w(k) \\ y(k) &= Cx(k) + D_1u(k) + D_2w(k). \end{aligned} \quad (\text{ec. 6.19})$$

Donde las matrices de definición del sistema de bajo orden son las identificadas en el caso anterior. Empleando este modelo, se pueden calcular los N_y estados futuros, obteniendo:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k + N_y) &= A^{N_y}x(k) + A^{N_y-1}B_1u(k) + A^{N_y-2}B_1u(k+1) + \dots + AB_1u(k + N_y - 1) + A^{N_y-1}B_2w(k) + \\ &+ A^{N_y-2}B_2w(k+1) + \dots + AB_2w(k + N_y - 1) \end{aligned} \quad (\text{ec. 6.20})$$

Y, conocidos los estados en el futuro se pueden calcular la salida del modelo en el futuro:

$$\begin{aligned} \hat{y}(k + N_y) &= CA^{N_y}x(k) + CA^{N_y-1}B_1u(k) + CA^{N_y-2}B_1u(k+1) + \dots + CAB_1u(k + N_y - 1) + CA^{N_y-1}B_2w(k) + \\ &+ CA^{N_y-2}B_2w(k+1) + \dots + CAB_2w(k + N_y - 1) \end{aligned} \quad (\text{ec. 6.21})$$

Pudiéndose observar que las salidas futuras solamente dependen del estado presente y de los inputs futuros, tanto los controlables como los incontrolables. Se pueden definir entonces los vectores de predicción de la salida de los modelos, de comandos del sistema y de excitaciones:

$$\hat{\mathbf{y}} = [\hat{y}^T(k+1) \quad \hat{y}^T(k+2) \quad \dots \quad \hat{y}^T(k+N_y)]^T, \quad (\text{ec. 6.22})$$

$$\hat{\mathbf{u}} = [\hat{u}^T(k) \quad \hat{u}^T(k+1) \quad \dots \quad \hat{u}^T(k+N_y-1)]^T, \quad (\text{ec. 6.23})$$

$$\hat{\mathbf{w}} = [\hat{w}^T(k) \quad \hat{w}^T(k+1) \quad \dots \quad \hat{w}^T(k+N_y-1)]^T, \quad (\text{ec. 6.24})$$

Entonces se puede escribir las N_y salidas futuras en forma matricial:

$$\hat{\mathbf{y}} = Fx(k) + \Psi_1\mathbf{u} + \Psi_2\mathbf{w}, \quad (\text{ec. 6.25})$$

Donde

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \dots \\ CA^{N_y} \end{bmatrix}, \quad (\text{ec. 6.26})$$

$$\Psi_1 = \begin{bmatrix} CB_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CAB_1 & CB_1 & 0 & \dots & 0 \\ CA^2 B_1 & CAB_1 & CB_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ CA^{N_y-1} B_1 & CA^{N_y-2} B_1 & CA^{N_y-3} B_1 & \dots & CAB_1 \end{bmatrix}, \text{ (ec. 6.27)}$$

$$\Psi_2 = \begin{bmatrix} CB_2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CAB_2 & CB_2 & 0 & \dots & 0 \\ CA^2 B_2 & CAB_2 & CB_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ CA^{N_y-1} B_2 & CA^{N_y-2} B_2 & CA^{N_y-3} B_2 & \dots & CAB_2 \end{bmatrix}, \text{ (ec. 6.28)}$$

Que son funciones exclusivamente de los parámetros del modelo, éstas se pueden calcular una vez al principio de la secuencia de control, de forma que no se emplee tiempo de computación durante la optimización en tiempo real. Definiendo el límite inferior de la banda de confort también de forma vectorial:

$$T_{\min} = [T_{\min}(k+1) \ T_{\min}(k+2) \ \dots \ T_{\min}(k+N_y)]^T, \text{ (ec. 6.29)}$$

Se puede expresar ahora el problema de optimización en la forma canónica de LP como sigue:

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar: } \mathbf{c}^T \mathbf{u} \\ &\text{Sujeta a: } \begin{bmatrix} -I \\ I \\ -\Psi_1 \end{bmatrix} \mathbf{u} \leq \begin{bmatrix} 0 \\ cu_{\max} \\ Fx(k) + \Psi_2 w - y_{\min} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Las componentes del vector \mathbf{c} son unos, la matriz I es la identidad de la dimensión que corresponda y el vector \mathbf{u} es la secuencia de comandos a obtener.

Existen numerosos algoritmos para resolver este problema de optimización, del que probablemente simplex es el más famoso y del que más fácilmente se puede encontrar información sobre su implementación (Reveliotis, 1997). No obstante, no se aplica en este trabajo, pues la simple consideración del marco de optimización era el objetivo perseguido.

Así, **se ha formulado el problema del Control Predictivo basado en el Modelo como un problema de optimización lineal resoluble con algoritmos sobradamente conocidos, demostrando así la posibilidad de emplear para control predictivo un modelo de orden reducido estimado a partir de un modelo de alto orden ajustado a los datos experimentales.**

6.3. OTRAS APLICACIONES

Aún existen dos aplicaciones de interés que se describen en este apartado muy brevemente. En primer lugar, el empleo de la **emulación para la optimización del comportamiento energético de las edificaciones**. La emulación es la simulación de un sistema en tiempo real. Mientras que la simulación puede adelantarse a los acontecimientos, la emulación se limita a reproducir la respuesta de un sistema en tiempo real.

En la operación de edificios inteligentes y conectados a redes energéticas bidireccionales un concepto cada vez más relevante es la maximización de la Energía Neta Producida (ENP). Para alcanzar este objetivo se deben tomar decisiones informadas en tiempo real que operen cada subsistema y tengan en cuenta los efectos del impredecible comportamiento de los usuarios y de las cambiantes condiciones meteorológicas. Inspirado en este concepto y en el seno del Séptimo Programa Marco en 2010 se constituyó el proyecto PEBBLE (Positive-Energy Buildings is attained thru Better Control dEcisions, Edificios de Energía Positiva se logran a través de un mejor control) (<http://www.pebble-fp7.eu/>). El proyecto consta de varios edificios en los que se implementa un sistema de control predictivo basado en modelos de alto orden y en los que dos de ellos implementan emuladores a través del software TRNSYS empleado en dos de los tres edificios demostradores que conforman el proyecto.

Por otra parte, la integración de los edificios en redes inteligentes de distrito es un fenómeno al que se presta cada vez más atención y que, en cierto sentido, se encuadra dentro de iniciativas como la europea Smart Cities (<http://www.smart-cities.eu/>). El diseño y operación avanzada de estos sistemas implica la simulación de una gran cantidad de edificios y las interacciones entre ellos. Esta tarea redundaría en la disponibilidad de una gran potencia de cálculo. El empleo de modelos de orden reducido ajustados según lo mostrado en la sección anterior puede permitir la optimización de los recursos computacionales a la hora de abordar numéricamente estos problemas. A día de hoy no se tiene información de si existe algún proyecto que implique el empleo de modelos de orden reducido en el diseño, operación y/o mantenimiento de las Smart Cities.

6.4. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En los siguientes puntos a continuación se resumen los resultados más relevantes de este capítulo:

- Se han identificado dos grandes grupos de aplicaciones de un modelo de alto orden ajustado: la evaluación de las estimaciones teóricas “a priori” y las aplicaciones en el ámbito del control predictivo.
- Con respecto a la evaluación teórico experimental se ha descrito una versión de la solución de las ecuaciones del modelo a temperatura constante.
- Con respecto al cálculo de la demanda energética del C-DdI se han obtenido las siguientes conclusiones en base a las diferentes aproximaciones consideradas:

- **El valor real de la reflectancia hemisférica del terreno supone una variación de un 5% de la demanda energética de calefacción y de un 10% de la de refrigeración y es de esperar que en edificios de varias plantas este efecto se vea acrecentado.**
- **La tasa de renovaciones de aire en concepto de infiltración ha sido sobrestimada en la evaluación “a priori”. La reducción de la demanda asciende a un 85% en calefacción y un 30% en refrigeración.**
- **La modelización del intercambio de calor con el terreno bajo el C-Ddl, junto con la tasa de infiltraciones, tienen la mayor influencia. La consideración de la temperatura del terreno bajo el edificio como una constante a determinada profundidad ofrece valores alejados de la realidad. A partir de aproximaciones más realistas se obtiene que la demanda de calefacción aumenta un 250%, y la refrigeración el 100%.**
- **El efecto del puente térmico debido al forjado continuo disminuye la demanda de calefacción algo menos de un 10% y aumenta la de refrigeración muy ligeramente.**
- **Cuando se aplican todos los cambios simultáneamente al modelo se observa que el modelo empleado en la evaluación previa del C-Ddl infraestimó la demanda energética tanto en valores de calefacción como en el de refrigeración. De hecho, el aumento de la demanda de calefacción del modelo ajustado con respecto al original es cercano al 40%, el valor en refrigeración cercano al 100% y en total en torno a un 90%.**
- **Con respecto a las comparaciones con la demanda energética experimental:**
 - **Con las hipótesis de partida del modelo la estimación de la demanda se encuentra lejos del valor experimental en condiciones reales de uso.**
 - **Se debe ajustar la temperatura de consigna a valores cercanos a las condiciones reales de uso e introducir un término de ventilación mecánica, siendo éste último término el dominante en el cálculo de la demanda.**
- **Con respecto a las aplicaciones del modelo ajustado respecto al control predictivo basado en el Modelo:**
 - **Se ha realizado una revisión del estado del arte sobre control predictivo, destacando que la primera demostración reflejada en la literatura data de 2011.**
 - **Se ha demostrado que emplear un modelo de alto orden resuelve cuestiones relativas a la unicidad del modelo reducido de espacio de estados empleado y a la estabilidad del mismo.**
 - **Se ha obtenido un modelo de orden reducido, cuyo orden en función de transferencia es predicho por la estructura física del modelo ajustado de alto orden en espacio de estados.**

- Se ha empleado el modelo de alto orden para obtener datos de identificación de parámetros que aseguren una excitación suficiente.
- **Se han estimado los parámetros del modelo de orden reducido y se ha comprobado numéricamente la estabilidad del modelo predicha por la estructura física.**
- Se ha definido una función de coste adecuada para el problema del control predictivo, que representa un balance entre el consumo energético y el confort térmico asociado.
- **Se ha formulado el problema del control predictivo basado en un modelo físico en términos de una técnica matemática sobradamente conocida como Programación Lineal, lo que permite obtener la secuencia óptima de comandos de predicción.**
- Se ha mostrado que **un modelo de alto orden ajustado se puede emplear** en el denominado entorno de **emulación para optimizar la respuesta de un edificio**, ofreciendo un **proyecto europeo (2010) como ejemplo de un acoplo directo entre un modelo de simulación y el sistema de control.**
- Finalmente, se ha apuntado la posibilidad del empleo de los modelos de orden reducido en el contexto de la iniciativa europea Smart Cities.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

7. CONCLUSIONES

Aunque al final de cada uno de los capítulos se han resumido los resultados más relevantes, en esta sección se revisan los resultados más relevantes desde el punto de vista de los objetivos iniciales del trabajo.

El objetivo del trabajo ha sido dual: por una parte pretende emplear los **modelos de simulación** para la **evaluación energética de edificaciones en condiciones reales de uso**. Por otra parte pretende aplicarlo al **control predictivo basado en el modelo físico** de edificaciones.

Se resumen los resultados en orden inverso al presentado originalmente en el trabajo, lo que permite distinguir claramente sus aportaciones más innovadoras. Así, **se ha conseguido un esquema numérico que, basado en un pronóstico meteorológico y un modelo de bajo orden del edificio, permite obtener la secuencia óptima en confort y consumo energético de órdenes del sistema de control.**

Se ha conseguido emplear un modelo de simulación para obtener un modelo de orden reducido del edificio. Este hecho asegura la estabilidad del modelo, una de las características principales que debe cumplir un modelo empleado en control. Por otra parte se asegura la unicidad del modelo en espacio de estados, otra de las dificultades a superar desde el punto de vista de la identificación de los sistemas.

Se ha empleado un modelo de simulación ajustado a los datos experimentales para evaluar las deficiencias en la modelización original del edificio bajo estudio. Es una de las aplicaciones de interés que permitirá mejores modelizaciones en el futuro. Se identifica el intercambio con el terreno como uno de los aspectos más relevantes en edificios con este factor de forma. Se cuantifica el efecto de la tasa de infiltraciones, de la reflectancia hemisférica del terreno y de los puentes térmicos existentes debido al método constructivo empleado.

Se ha conseguido un modelo de simulación que representa, desde el punto de vista del control de los sistemas, la evolución temporal de la temperatura del aire interior en despachos diferentes y en condiciones reales de uso. Este hecho es particularmente representativo, puesto que existe la posibilidad de ajustar un modelo particular para una situación determinada que luego no se pueda generalizar. En el caso que nos ocupa se ha demostrado que tanto el despacho orientado al sur y el orientado al norte son susceptibles de ser controlados predictivamente basándose en el modelo ajustado. También se identifica la situación de un despacho en el que el modelo debe mejorarse como trabajo futuro. El despacho se encuentra en una esquina, por lo que el modelo ajustado es válido en la gran mayoría de las estancias que lo conforman.

Evolución temporal

Se ha verificado que el modelo es estable en una serie temporal diferente a la de identificación de parámetros. El modelo ajusta sus parámetros con la serie temporal correspondiente a 2009 y se comprueba su funcionamiento con la serie correspondiente a 2010. Este hecho es una comprobación de la estabilidad de la estimación, mientras que aplicarlo a otro despacho es una medida de universalidad.

Se ha conseguido un modelo de simulación ajustado, desde el punto de vista del control de los sistemas, y que identifica parámetros térmicos de los sistemas activos en condiciones reales de uso. El modelo ajustado ofrece, en el despacho 13, valores para las renovaciones por hora introducidas por el sistema de ventilación mecánica que se desvían menos del 10% de los valores nominales. Se han modelizado, además, las variables endógenas necesarias para obtener este resultado.

Se ha conseguido emplear medidas de concentración de CO₂ en el aire interior para estimar los intercambios de aire en determinadas condiciones y los resultados son coherentes con los obtenidos por el modelo de simulación ajustado. Mediante la exploración sistemática de las series temporales de datos se ha obtenido una serie de situaciones en las que el usuario había abandonado el despacho, cerrado la puerta y el sistema de ventilación mecánica seguía en funcionamiento. En esos casos, mediante la aplicación del método de la caída de la concentración, se puede averiguar la tasa de renovaciones de aire en la estancia.

Se ha cuantificado, mediante ensayo, que la medida de la temperatura de la superficie interior del vidrio bajo la incidencia de la radiación solar directa está linealmente correlacionada con la irradiancia solar global sobre la vertical. Mediante estudios posteriores se podrá cuantificar este fenómeno, siendo capaces de sustraerlo de la medida de la temperatura. Se identifican aplicaciones al control de este fenómeno.

Mediante las diferentes bandas de incertidumbre experimental, se ha distinguido entre aplicaciones al control de los sistemas e identificabilidad de los procesos físicos fundamentales. Este punto no es habitual en los trabajos previos. De hecho, en la mayoría de los trabajos se ajustan modelos al máximo, sin tener en cuenta que por debajo de la incertidumbre experimental no se pueden resolver las diferentes correlaciones. Dado que el sistema de control es menos preciso que el de medida experimental un modelo que no entra dentro de la franja de incertidumbre experimental de la medida puede estar completamente contenido en la banda de incertidumbre del sistema de control y ser empleado de forma efectiva para ello.

Exclusivamente desde el punto de vista numérico se ha identificado un puente térmico debido al voladizo por forjado continuo y se ha identificado que el sombreamiento de cubierta es deficiente. Entre las fortalezas del modelo ajustado para la evolución libre hay que destacar que las hipótesis introducidas son coherentes con la inspección visual (se comprobó que la cubierta, efectivamente, no estaba sombreada) y el principio de mínima variación de hipótesis en los modelos.

Se ha conseguido un modelo de simulación que representa adecuadamente la evolución temporal en evolución libre de la temperatura del aire interior. En el despacho 13 se ha identificado un modelo modificando mínimamente el original que da cuenta de la evolución libre. En el despacho de becarios también se cumple este fenómeno desde el punto de vista de la incertidumbre del sistema de medida y no sólo desde el control. Por otra parte, el modelo modificado se puede considerar una versión efectiva unidimensional de los fenómenos multidimensionales como es el caso del puente térmico debido al voladizo.

Se ha desarrollado software para que Matlab ejecute TRNSYS como una función externa y ajuste los parámetros de los modelos con el algoritmo genético conocido como evolución diferencial. Este hecho es de la mayor importancia, pues sin un esquema de optimización multiobjetivo no se pueden realizar los ajustes y su implementación técnica es laboriosa y no siempre está asegurado el éxito técnico.

Se ha desarrollado un método general para la obtención de la reflectancia hemisférica del terreno a partir de series cortas de medidas de irradiancia solar global sobre la horizontal y la vertical. Este método, además, es susceptible de emplearse en el entorno urbano donde la medida de la componente reflejada de la irradiancia solar presenta particulares dificultades. Asimismo, **se ha obtenido la difusividad térmica efectiva del terreno mediante el ajuste a una relación calculada analíticamente de la temperatura del terreno bajo el C-Ddl.** Se demuestra que el terreno a medio metro por debajo del C-Ddl está en intercambio y que a un metro se puede postular con éxito una relación efectiva de transferencia de calor unidimensional. Se identifica para un trabajo futuro con respecto a la modelización de la transferencia de calor multidimensional en el terreno y su aplicación a la modelización del comportamiento térmico de las edificaciones. Finalmente, **se ha comprobado que la cobertura nubosa obtenida en onda corta no coincide con la obtenida en onda larga y se ha corregido experimentalmente el fenómeno de intercambio de calor radiativo de onda larga.**

Se ha comprobado que la estimación de los parámetros libres del modelo original da lugar a inconsistencias físicas, descartando su validez.

Se ha calculado la incertidumbre teórica del modelo mediante técnicas de montecarlo y se ha comprobado que la relación modelo-experimento es adecuada. Este cálculo rara vez se emprende y es fundamental. La mayoría de los investigadores consideran que los modelos teóricos tienen infinita precisión. Si la incertidumbre del modelo es mayor que la experimental, no se podrá usar el modelo para comparar con las medidas.

Se han emprendido campañas adicionales de monitorización con dispositivos portátiles. Estas diferentes campañas han **servido para comprobar que se verifica la validez de aproximación a un nodo.** Asimismo, se ha implementado un **análisis de componentes principales para averiguar que los despachos seleccionados son representativos del conjunto.**

Se han realizado termografías para comprobar que, en primera aproximación, el cerramiento es homogéneo. Aunque se trata de una técnica cualitativa, en el caso de un defecto manifiesto podría haberse revelado de forma sencilla.

Se ha comprobado que los despachos seleccionados operan dentro de la banda de confort. De este modo se asegura que la identificación se realiza en condiciones de operación que no se alejan particularmente del punto de diseño.

Se ha realizado una instalación experimental con una incertidumbre de 0.5 °C (incluida toda la cadena de medida) y se han obtenido series de datos de varios meses que incluyen todos los regímenes de excitación. La campaña de monitorización se puede considerar exitosa, pues se tienen periodos de evolución libre, periodos dominados por la calefacción y periodos dominados por la refrigeración. Asimismo, hay dos series largas que permiten realizar la identificación y la validación. Por otra parte, en la incertidumbre experimental se tiene en cuenta toda la cadena de medida, obteniéndose una instalación experimental de elevada calidad.

Basándose en resultados previos del grupo de investigación, se demuestra que son necesarias para resolver las correlaciones entre parámetros activos, la inclusión de la temperatura de la superficie interior del vidrio y de la temperatura de la superficie interior del suelo. Si no se pueden resolver las correlaciones entre parámetros activos el experimento no puede ser concluyente. Experimentos multisalida previos han permitido obtener este resultado innovador desde el punto de vista del diseño experimental, en lo referente a la validación de modelos de simulación.

Se ha implementado un análisis de sensibilidad para la obtención de los parámetros activos del modelo, definiendo propiedades estáticas y dinámicas por separado, y se ha analizado la correlación entre los mismos. Este hecho es común en la literatura referente al

diseño experimental. La novedad en este caso reside en el hecho de distinguir las características estáticas y dinámicas por separado lo que lleva invariablemente a una situación multiobjetivo. En los diseños experimentales en los que se realizan análisis de sensibilidad lo más habitual es que se consideren uniobjetivo.

Se ha estudiado el C-Ddl desde las etapas previas a su construcción y se ha realizado un seguimiento del mismo. El proyecto arquitectónico básico ha sido estudiado y se han sugerido modificaciones al mismo para que su comportamiento energético sea el mejor posible. De este modo se asegura que se conocen los materiales y sus propiedades termofísicas con suficiente precisión como para realizar un estudio científico.

Se ha conseguido un proyecto financiado para realizar estos estudios. Aunque parezca baladí, una de las partes más importantes de todo estudio consiste en convencer al resto de la sociedad de que se trata de algo lo suficientemente relevante como para que destine recursos a ello.

CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA

Adjali y col., 2000. M.H Adjali, M Davies, S.W Rees, J Littler, Temperatures in and under a slab-on-ground floor: two- and three-dimensional numerical simulations and comparison with experimental data, *Building and Environment*, Volume 35, Issue 7, 1 October 2000, Pages 655-662, ISSN 0360-1323, 10.1016/S0360-1323(99)00050-5.

Aguilar y Page, 1999. Aguiar, R., Page, J., 1999. ESRA handbook chapter 3. In: Palz,W., Greif, J., Scharmer, J. (Eds.), *European Solar Radiation Atlas*. Third ed., Brussels, Belgium.

Andersen y col., 2000. Klaus Kaae Andersen, Henrik Madsen, Lars H. Hansen, Modelling the heat dynamics of a building using stochastic differential equations, *Energy and Buildings*, Volume 31, Issue 1, January 2000, Pages 13-24, ISSN 0378-7788, 10.1016/S0378-7788(98)00069-3.

Anderson, 1991. B.R. Anderson, Calculation of the steady-state heat transfer through a slab-on-ground floor, *Building and Environment*, Volume 26, Issue 4, 1991, Pages 405-415, ISSN 0360-1323, 10.1016/0360-1323(91)90067-L.

Anderson, 1993. B.R. Anderson, The effect of edge insulation on the steady-state heat loss through a slab-on-ground floor, *Building and Environment*, Volume 28, Issue 3, July 1993, Pages 361-367, ISSN 0360-1323, 10.1016/0360-1323(93)90040-A.

Andolsun y col, 2011. Simge Andolsun, Charles H. Culp, Jeff Haberl, Michael J. Witte, EnergyPlus vs. DOE-2.1e: The effect of ground-coupling on energy use of a code house with basement in a hot-humid climate, *Energy and Buildings*, Volume 43, Issue 7, July 2011, Pages 1663-1675, ISSN 0378-7788, 10.1016/j.enbuild.2011.03.009.

Annex 21. <http://www.ecbcs.org/annexes/annex21.htm>

Annex 41. <http://www.ecbcs.org/annexes/annex41.htm>

Annex 42. <http://www.ecbcs.org/annexes/annex42.htm>

Annex 43. <http://www.ecbcs.org/annexes/annex43.htm>

ANNEX 58, 2012. <http://www.ecbcs.org/annexes/annex58.htm> , visto por última vez en junio de 2012.

ASHRAE, 1997. ASHRAE, "Handbook of Fundamentals", American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Atlanta USA, 1997.

Bacher y Madsen, 2011. Peder Bacher, Henrik Madsen, Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings, *Energy and Buildings*, Volume 43, Issue 7, July 2011, Pages 1511-1522, ISSN 0378-7788, 10.1016/j.enbuild.2011.02.005.

Bauer y Lukas, 2011. Bauer, F., Lukas, M.A., 2011. Comparing parameter choice methods for regularization of ill-posed problems. *Mathematics and Computers in Simulation*, 81, 1795-1841.

Bayona, 2012. Bioclimatic study of the Physic Sciences Faculty at UCM (Madrid, Spain). Master Thesis. Julia Bayona. Ed. UCM. Madrid 2012.

Berzkin y col, 2006. Berezkin, V., Kamenev, G., Lotov, A. Hybrid adaptive methods for approximating a nonconvex multidimensional Pareto frontier, *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 46, 11, pp 1918-1931 (2006).

BES, 2012. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/, enlace izquierdo a las herramientas por orden alfabético (Tools listed alphabetically). Visto por última vez: junio de 2012.

Bigh y col., 1978. Bligh T.P., Shipp P. y Meixel G., "Energy comparisons and where to insulate earth sheltered buildings and basements. Earth covered settlements", U.S. Department of Energy Conference, Fort Worth, TX, 1978.

BRE, 1984. BRE, Glasgow Commercial Building Monitoring Project: Final Report, IEA Annex 4, Building Research Establishment, Watford, ISBN 085125 070X, May 1984.

Bouhamidi y Jbilou, 2007. Bouhamidi, A., Jbilou, K., 2007. Sylvester Tikhonov-regularization methods in image restoration. Journal of Computational and Applied Mathematics, 1, 86-98.

Bourquini y Nassiopoulos, 2011. Bourquin, F., Nassiopoulos, A., 2011. Inverse reconstruction of initial and boundary conditions of a heat transfer problem with accurate final state. International Journal of Heat and Mass Transfer, 54, 3749-3760.

Castilla y col., 2010. M. Castilla, J.D. Álvarez, M. Berenguel, M. Pérez, F. Rodríguez, J.L. Guzmán, Técnicas de Control del Confort en Edificios, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, Volume 7, Issue 3, July 2010, Pages 5-24, ISSN 1697-7912, 10.1016/S1697-7912(10)70038-8.

Carslaw y Jaeger, 1959. H.S. Carslaw y J.C. Jaeger, "Conduction of Heat in Solids", Oxford University Press, 1959.

Chapman, 1981. Chapman A.J. "Heat transfer", 4th ed. Macmillan, New York, 1981.

Chen y col., 2009. Chen, Z., Xiang, C., Zhao, K., Liu, X., 2009. Convergence analysis of Tikhonov-type regularization algorithms for multiobjective optimization problems. Applied Mathematics and Computation, 211, 167-172.

Chuangchid y col., 2000. Chuangchid, P., Krarti, M., Steady-Periodic Three-Dimensional Foundation Heat Transfer From Refrigerated Structures, Journal of Solar Energy Engineering, Volume 122, May 2000, pp. 69-83.

Clarke, 1988. J.A. Clarke, D. McLean, ESP-A building and plant energy simulation system Energy Simulation Research Unit, University of Strathclyde, Strathclyde (1988).

Clay, 2012. http://www.claymath.org/millennium/Navier-Stokes_Equations/, visto por última vez en junio de 2012.

Coulson y Raynolds, 1971. Coulson, K.L., Raynolds, D.W., 1971. Spectral reflectance of natural surfaces. Journal of Applied Meteorology 10, 1285-1295.

Coello, 2004. Coello, A. Handling Multiple Objectives With Particle Swarm Optimization. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 8, no. 3, June 2004.

Coley y Penman, 1996. D.A. Coley, J.M. Penman, Simplified thermal response modelling in building energy management. Paper III: Demonstration of a working controller, Building and Environment, Volume 31, Issue 2, March 1996, Pages 93-97, ISSN 0360-1323, 10.1016/0360-1323(95)00043-7.

CTE, 2006. Código Técnico de la Edificación, www.codigotecnico.org.

Davies, 2004a. M.G. Davies, Calculation of wall conduction transfer coefficients by regression in the frequency domain, *Building and Environment*, Volume 39, Issue 5, May 2004, Pages 589-590, ISSN 0360-1323, 10.1016/j.buildenv.2003.10.001.

Davies, 2004b. M.G. Davies, Wall thermal capacity and transfer coefficients, *Building and Environment*, Volume 39, Issue 1, January 2004, Pages 109-112, ISSN 0360-1323, 10.1016/S0360-1323(03)00136-7.

Davies, 2003. M.G. Davies, A rationale for nodal placement for heat flow calculations in walls, *Building and Environment*, Volume 38, Issue 2, February 2003, Pages 247-260, ISSN 0360-1323, 10.1016/S0360-1323(02)00057-4.

Day. I.J., 2011. On the inversion of diffusion NMR data: Tikhonov regularization and optimal choice of the regularization parameter. *Journal of Magnetic Resonance*, In Press, Corrected Proof, Available online 31 May 2011.

De Miguel y col., 2001. de Miguel, A., Bilbao, J., Aguiar, R., Kambezidis, H. and Negro, E., 2001. Diffuse solar irradiation model evaluation in the North Mediterranean Belt area. *Solar Energy*. 70, 143-153.

Dedieu y col, 1987. Dedieu, G., Deschamps, P. Y. and Kerr, Y. H., 1987. Satellite estimation of solar irradiance at the surface of the Earth and of surface albedo using phisycal model applied to Meteosat data. *Journal of Climate and Applied Meteorology*. 26, 79-87.

DE4, 2010. DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. *Official Journal of the European Union*, 18 de junio de 2010.

DIN, 2002. DIN EN 60688. (2002). Electrical measuring transducers for converting a.c. electrical quantities to analogue or digital signals (IEC 60688:1992 + A1:1997, modified + A2:2001).

DOE, 1981. US Dept of Energy, IEA Annex 1: Comparison of Load Determination Methodologies for Building Analysis Programs, DOE/CE/20184-1, US Dept Energy, Washington DC, 1981.

Duffie y Beckman, 1991. Duffie J. A., Beckman W. A., "Solar Engineering of thermal processes". Ed. J. Wiley & Sons, 1991. Inc. ISBN 0-471-51056-4.

Egger y Engl, 2005. Egger, H., Engl, H.W., 2005. Tikhonov regularization applied to the inverse problem of option pricing: convergence analysis and rates. *Inverse problems*, 21.

Egger y col., 2009. Egger, H., Heng, Y., Marquardt, W., Mhamdi, A., 2009. Efficient solution of a three-dimensional inverse heat conduction problem in pool boiling. *Inverse Problems*, 25.

European standard EN ISO 13370: Thermal performance of buildings—heat transfer via ground—calculation methods (ISO 13370:1998), CEN, 1998.

Enríquez y col, 2008. Enriquez, R., Jiménez, M.J., Heras, M.R., 2008. Identification of a change in the thermal dynamics of a wall. The 29th AIVC Conference on Advanced Building ventilation and environment technology for addressing climate change issues, Kyoto.

Enríquez y col, 2012. R. Enriquez, L. Zarzalejo, M.J. Jiménez, M.R. Heras, Ground reflectance estimation by means of horizontal and vertical radiation measurements, *Solar Energy*, Volume 86, Issue 11, November 2012, Pages 3216-3226.

EUMETSAT, (Report 2003). Meteosat surface albedo. Product user's manual and format guide. EUMETSAT, Darmstadt (Germany).

Faber, 1980. Oscar Faber and Partners, IEA Annex 1 Computer Modelling of Building Performance: Results and Analyses of Avonbank Simulation, Oscar Faber and Partners, St Albans, UK, 1980.

Faimen y col, 1992. Faiman, D., Feuermann, D., Ibbetson, P. and Zemel, A., 1992. A multipyranometer instrument for obtaining the solar beam and diffuse components, and the irradiance on inclined planes. *Solar Energy*. 48, 253-259.

Fanger, 1988. Fanger, P.O., Melikov, A.K., Hanzawa, H. and Ring, J. Air Turbulence and Sensation of Draught. *Energy and Buildings* 12(1988) 21-39, Elsevier Amsterdam 1988.

Ferre y col., 2010. Ferre J.A., Pasamontes M., Castilla M.M., Bravo D., Sánchez N., Berenguel M., Jiménez M.J., Pérez M. 2010. In Spanish. "Desarrollo de un software para sistema de monitorización para edificios bioclimáticos en el marco del proyecto ARFRISOL.". Presented at congress: "I Congreso sobre Arquitectura Bioclimática y Frío Solar". Aguadulce, Almería, Spain. 23-26 March 2010. ISBN: 978-84-693-5141-3.

Friling y col., 2009. Nynne Friling, María José Jiménez, Hans Bloem, Henrik Madsen, Modelling the heat dynamics of building integrated and ventilated photovoltaic modules, *Energy and Buildings*, Volume 41, Issue 10, October 2009, Pages 1051-1057, ISSN 0378-7788, 10.1016/j.enbuild.2009.05.018.

Gallego y col., 2011. C. Gallego, P. Pinson, H. Madsen, A. Costa, A. Cuerva, Influence of local wind speed and direction on wind power dynamics – Application to offshore very short-term forecasting, *Applied Energy*, Volume 88, Issue 11, November 2011, Pages 4087-4096, ISSN 0306-2619, 10.1016/j.apenergy.2011.04.051.

dos Santos y Mendes, 2006. Gerson H. dos Santos, Nathan Mendes, Simultaneous heat and moisture transfer in soils combined with building simulation, *Energy and Buildings*, Volume 38, Issue 4, April 2006, Pages 303-314, ISSN 0378-7788, 10.1016/j.enbuild.2005.06.011.

Ghiaus y Hazyuk, 2010. Christian Ghiaus, Ion Hazyuk, Calculation of optimal thermal load of intermittently heated buildings, *Energy and Buildings*, Volume 42, Issue 8, August 2010, Pages 1248-1258, ISSN 0378-7788, 10.1016/j.enbuild.2010.02.017.

Gouda y Danaher, 2002. M.M. Gouda, S. Danaher, C.P. Underwood, Building thermal model reduction using nonlinear constrained optimization, *Building and Environment*, Volume 37, Issue 12, December 2002, Pages 1255-1265, ISSN 0360-1323, 10.1016/S0360-1323(01)00121-4.

Graham y King, 1961. Graham, W.G., King, K.M., 1961. Shortwave reflection coefficient for a field of maize. *Journal of Applied Meteorology* 2, 425–428.

Hall, 1978. Hall, I.J. Generation of a Typical Meteorological Year. Annual Meeting of AS of ISES, Denver CO, 1978.

Hay, J. E., 1993. Calculating solar radiation for inclined surfaces: Practical approaches. *Renewable Energy*. 3, 373-380.

Hazyuk y col, 2012a. Ion Hazyuk, Christian Ghiaus, David Penhouet, Optimal temperature control of intermittently heated buildings using Model Predictive Control: Part I – Building modeling, *Building and Environment*, Volume 51, May 2012, Pages 379-387, ISSN 0360-1323, 10.1016/j.buildenv.2011.11.009.

Hazyuk y col, 2012b. Ion Hazyuk, Christian Ghiaus, David Penhouet, Optimal temperature control of intermittently heated buildings using Model Predictive Control: Part II – Control algorithm, *Building and Environment*, Volume 51, May 2012, Pages 388-394, ISSN 0360-1323, 10.1016/j.buildenv.2011.11.008.

Huang y col., 1988. Y.J. Huang, L.S. Shen, J.C. Bull, L.F. Goldberg, Whole-house simulation of foundation heat flows using the DOE-2.1C program, *ASHRAE Transactions* 94 (2) (1988) 936–958.

Heras y col, 2001. Heras, M.R.; San Isidro, M.J.; Zarzalejo, L.; Jiménez, M.J. “Meduca Project. Energetic Evaluation of UAL building (Final Report)”. Informe Técnico: DER-ESE-AECED-46114-IT-1-0. Abril 2001.

Heras y col., 2005. Heras, M.R.; San Isidro, M.J; Zarzalejo, L; Jiménez, M.J. “Energetic analysis of a passive solar design, incorporated in a courtyard after refurbishment, using an innovative cover component based in a sawtooth roof concept”. *Solar Energy* Vol. 78, Nº 1. 2005.

Holst, 1993. Holst, S., "Heating load of a building model in TRNSYS with different heating systems", *ZAE Bayern, Abt. 4, TRNSYS-User Day 1993*, Stuttgart.

Hong y col., 2000. Tianzhen Hong, S.K Chou, T.Y Bong, Building simulation: an overview of developments and information sources, *Building and Environment*, Volume 35, Issue 4, 1 May 2000, Pages 347-361, ISSN 0360-1323, 10.1016/S0360-1323(99)00023-2.

Hotteling, 1933. H. Hotteling, Analysis of complex statistical variables into principal components, *Journal of Educational Psychology* 24 (1933) 417–441.

Idemen, M., Alkumru, A., A new method to compute the spreading resistance by Tikhonov regularization. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 63, 562-568.

Ineichen y col., 1987. Ineichen, P., Perez, R., Seals, R., 1987. The importance of correct albedo determination for adequately modelling energy received by tilted surface. *Solar Energy* 39, 301–305.

Ineichen y col., 1990. Ineichen, P., Guisan, O., Perez, R., 1990. Ground-reflected radiation and albedo. *Solar Energy* 44, 207–214.

Incropera, 1999. Incropera F.P., “Fundamentos de transferencia de calor”, Fourth Ed., 1999.

IEC, 1983. International Electrotechnical Commission. (1983). CEI IEC 751. Industrial platinum resistance thermometer sensors.

IEC, 1982. International Electrotechnical Commission. (1982). CEI IEC 60584-2+A1. Termopares. Parte 2: Tolerancias.

Neymark y Judkoff, 2008. International Energy Agency Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method (IEA BESTEST). In-Depth Diagnostic Cases for Ground Coupled Heat Transfer Related to Slab-On-Grade Construction. J. Neymark y R. Judkoff.

ISO, 1995. International Standardization Organization. 1995. ISO Guide to the expression of uncertainty in measurement. Ginebra. ISBN 92-67-10188-9.

ISO 9060. International Standardization Organization. ISO 9060:1990. Solar energy – Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation.

ISO 7730, Moderate Thermal Environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, 1995.

ISO 8996, Ergonomics – Determination of Metabolic Heat Production, 1990 (para ver los mets que pierde una persona)

ISO 9920, Ergonomics of the Thermal Environment – Estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble, 1995.

Janssen y col., 2004. Hans Janssen, Jan Carmeliet, Hugo Hens, The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground, Building and Environment, Volume 39, Issue 7, July 2004, Pages 825-836, ISSN 0360-1323, 10.1016/j.buildenv.2004.01.004.

Jensen, 1993. Jensen S O (ed), Validation of Building Energy Simulation Programs, Part I and II, Research Report PASSYS Subgroup Model Validation and Development, CEC, Brussels, EUR 15115 EN, 1993.

Jiménez y Madsen, 2008. Jimenez M.J. y Madsen H., “Models for describing the thermal characteristics of building components”, número especial de Building and Environment sobre ensayos de cerramientos en condiciones reales. Building and Environment, 43(2), pp. 152-162, febrero-2008.

Jiménez y col., 2008. M.J. Jiménez, H. Madsen, J.J. Bloem, B. Dammann, Estimation of non-linear continuous time models for the heat exchange dynamics of building integrated photovoltaic modules, Energy and Buildings, Volume 40, Issue 2, 2008, Pages 157-167, ISSN 0378-7788, 10.1016/j.enbuild.2007.02.026.

Jiménez y col., 2009. M.J. Jiménez, B. Porcar, M.R. Heras, Application of different dynamic analysis approaches to the estimation of the building component U value, Building and Environment, Volume 44, Issue 2, February 2009, Pages 361-367, ISSN 0360-1323, 10.1016/j.buildenv.2008.03.010.

Jiménez y col., 2010. Jiménez, M.J., Enríquez, R., Olmedo, R., Sánchez, N., Heras, M.R.. 2010. In Spanish. “Monitorización energética de los C-DdIs del PSE-ARFRISOL. Diseño experimental”. Presented at congress: “I Congreso sobre Arquitectura Bioclimática y Frío Solar”. Aguadulce, Almería, Spain. 23-26 March 2010. ISBN: 978-84-693-5141-3.

Jiménez y Heras, 2005. Jiménez, M.J.; Heras, M.R. 2005. Application of multi-output ARX models to estimate the U and g values of building components from outdoors testing. Solar Energy. 79(3), pp. 302-310.

- Karhunen, 1946. K. Karhunen, Über lineare methoden für wahrscheinigkeitsrechnung, *Annales of Academic Science Fennicae, Series A1, Mathematical Physics* 37 (1946) 3–79.
- Kasten y CZeplak, 1980. Fritz Kasten, Gerhard Czeplak, Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud, *Solar Energy*, Volume 24, Issue 2, 1980, Pages 177-189, ISSN 0038-092X, 10.1016/0038-092X(80)90391-6.
- Kipp and Zonen, 2001. CG4 Pyrgemometer instructions manual.
- Kondratyev, K.Y., 1977. Radiation regime of inclined surfaces. Technical note No. 152, World Meteorological Organisation, WMO-No. 467, Geneva, 82 pp.
- Kummert y col., 2001. Michaël Kummert, Philippe André, Jacques Nicolas, Optimal heating control in a passive solar commercial building, *Solar Energy*, Volume 69, Supplement 6, July–December 2001, Pages 103-116, ISSN 0038-092X, 10.1016/S0038-092X(01)00038-X.
- Kummert y col., 2000. Kummert, M., André, P., Nicolas, J. Optimised thermal zone controller for integration within a Building Energy Management System. *Proceedings of CLIMA 2000 conference*; 1997. Bruselas, Bélgica.
- Kusuda, T, 1968. Least squares análisis of annual Earth temperatures cycles for selected stations in the United States. National Bureau of Standards, Gaithersburg (USA).
- Latta y Boileau, 1969. Latta, J.K. y Boileau G.G., "Heat losses from house basements", *Canadian Building* 19(10):39, 1969.
- Lee y col., 2010. Lee, S.H., Kim, J., Lee, J.H., Choe, W., 2010. Modified Phillips–Tikhonov regularization for plasma tomography. *Current Applied Physics*, 10, 893-899.
- Lei y col., 2011. Lei, J., Liu, S., Li, Z., Sun, M., Wang, X., 2011. A multi-scale image reconstruction algorithm for electrical capacitance tomography. *Applied Mathematical Modelling*, 35, 2585-2606.
- Li y Law, 2010. Li, X.Y., Law S.S., 2010. Adaptive Tikhonov regularization for damage detection based on nonlinear model updating. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24, 1646-1664.
- Liu y Jordan, 1963. Liu, B.Y.H., Jordan, R.C., 1963. The long term average performance of flat plate solar energy collectors. *Solar Energy* 7, 53–74.
- Liu y col., 2011. Liu, W., Sun, X., Shen, J., 2011. A V-curve criterion for the parameter optimization of the Tikhonov regularization inversion algorithm for particle sizing. *Optics & Laser Technology*, In Press, Corrected Proof, Available online 8 June 2011.
- Lam y Hui, 1996. Lam J.C. y Hui S.C., "Sensitivity analysis of energy performance of office buildings", *Building and Environment*, 31 (1), pp. 27-39, 1996.
- Lebrun y Liebecq, 1988. Lebrun J and Liebecq G, Annex 10 System Simulation Synthesis Report, University of Liege, Report No. AN10 881020-RF, 1988.
- Lechner, 1992. Lechner, Th., "Mathematical and physical fundamentals of the Transfer function method (in german)", Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, April 1992.
- Lodi y col., 2010. C. Lodi, P. Bacher, J. Cipriano, H. Madsen, Modelling the heat dynamics of a monitored Test Reference Environment for Building Integrated Photovoltaic

systems using stochastic differential equations, *Energy & Buildings* (2010), doi:10.1016/j.enbuild.2012.03.046.

Loève, 1955. M.M. Loève, *Probability Theory*, Princeton, Van Nostrand, 1955.

Lomas y Eppel, 1992. Lomas K.J. y Eppel H., "Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs", *Energy and Building*, 19 (1), pp. 21-44, 1992.

Madsen y Holst, 1995. Madsen H. y Holst J., "Estimation of continuous-time models for the heat dynamics of a building", *Energy and Building*, 22, pp. 67-79, 1995.

Manns y Coleman, 1996. T. Manns, M. Coleman, *Software quality assurance* (2nd ed.) Macmillan (1996).

Martin y Berdahl, 1984. M. Martin, P. Berdahl, *Characteristics of Infrared Sky Radiation in the United States*, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California - Berkeley, *Solar Energy* Vol. 33, No. 3/4, pp. 321-336, 1984.

Matthias y col., 2000. Matthias, A.D., Fimbres, A., Sano, E.E., Post, D.F., Accioly, L., Batchily, A.K., Ferreira, L.G., 2000. Surface roughness effects on soil albedo. *Soil Science Society of America Journal* 64, 1035–1041.

Mayor y Queloz, 1995. *Nature* 378, 355 - 359 (23 November 1995); doi:10.1038/378355a0.

Martin y Berdahl, 1984. M. Martin, P. Berdahl, *Characteristics of Infrared Sky Radiation in the United States*, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California - Berkeley, *Solar Energy* Vol. 33, No. 3/4, pp. 321-336, 1984.

Mazarron y col., 2008. Fernando R. Mazarron, Ignacio Canas, Exponential sinusoidal model for predicting temperature inside underground wine cellars from a Spanish region, *Energy and Buildings*, Volume 40, Issue 10, 2008, Pages 1931-1940, ISSN 0378-7788, 10.1016/j.enbuild.2008.04.007.

McLean y Clarke, 1985. McLean D J and Clarke J A, 'Results of the Collins Building VAV Air Conditioning Simulation', IEA Annex 10 Interim Report, April 1985

Mejri y col., 2011. Olfa Mejri, Elena Palomo Del Barrio, Nadia Ghrab-Morcos, Energy performance assessment of occupied buildings using model identification techniques, *Energy and Buildings*, Volume 43, Issues 2–3, February–March 2011, Pages 285-299, ISSN 0378-7788, 10.1016/j.enbuild.2010.09.010.

Mihalakakou y col., 1997. G. Mihalakakou, M. Santamouris, J.O. Lewis, D.N. Asimakopoulos, On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles, *Solar Energy*, Volume 60, Issues 3–4, March–April 1997, Pages 181-190, ISSN 0038-092X, 10.1016/S0038-092X(97)00012-1.

Nielsen y col., 2000. Jan Nygaard Nielsen, Henrik Madsen, Peter C. Young, Parameter estimation in stochastic differential equations: An overview, *Annual Reviews in Control*, Volume 2, 2000, Pages 83–94.

Mejri y col., 2011. Mejri, O., Palomo Del Barrio, E., Ghrab-Morcos, N., 2011. Energy performance assessment of occupied buildings using model identification techniques. *Energy and Buildings*, 43, 285-299.

Minnis y col., 1997. Minnis, P., Mayor, S., Smith Jr., W.L., Young, D.F., 1997. Asymmetry in the diurnal variation of surface albedo. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35 (4), 879–890.

Mitalas y Arseneault, 1971. Mitalas, G.P. and Arseneault, J.G., "FORTRAN IV Program to Calculate z-Transfer Functions for the Calculation of Transient Heat Transfer Through Walls and Roofs", Division of National Research Council of Canada, Ottawa, 1971.

Muneer, T., 2004. *Solar radiation and daylight models*. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford (UK).

Munn, R.E., Truhlar, E.J., 1963. The energy budget approach to heat transfer at the surface of the earth. *Transactions of Engineering Institute of Canada* 6 (B-7), 1–20.

Morant, 1986. Morant M-A, Annex 10 System Simulation: The La Chaumiere exercises. Report AN10 860327 - 01, 1986.

NBE-79. Norma Básica de la Edificación NBE CT-79, Condiciones térmicas en los edificios, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid, 1979.

Ndiaye y Gabrielb, 2011. Ndiaye, D., Gabrielb, K., 2011. Principal component analysis of the electricity consumption in residential dwellings. *Energy and Buildings* 43, 446–453

Orgill, J. F. and Hollands, K. G. T., 1977. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar Energy*. 19, 357-359.

Palomo y col., 1991. E. PALOMO, J. MARCO and H. MADSEN, Methods to compare measurements and simulations, In *Building Simulation'91*, IBPSA Conference, Nice, France (1991).

Palomo y col., 1993. E. PALOMO and J. MARCO, The pertinence and limitations of different statistical tools for empirical validation purposes, In *3er European Conference on Architecture*, Florence, Italy (1993).

Palomo y col., 2002. E. Palomo del Barrio, G. Guyon, Using parameters space analysis techniques for diagnosis purposes in the framework of empirical model validation, Final Report, Task 22: Building Energy Analysis Tools, International Energy Agency.

Palomo y col., 2003. Elena Palomo Del Barrio, Gilles Guyon, Theoretical basis for empirical model validation using parameters space analysis tools, *Energy and Buildings*, Volume 35, Issue 10, November 2003, Pages 985-996, ISSN 0378-7788, 10.1016/S0378-7788(03)00038-0.

Palomo y col., 2004. Elena Palomo del Barrio, Gilles Guyon, Application of parameters space analysis tools for empirical model validation, *Energy and Buildings*, Volume 36, Issue 1, January 2004, Pages 23-33, ISSN 0378-7788, 10.1016/S0378-7788(03)00039-2.

Pasamontes y col., 2006. M. Pasamontes, M. Berenguel, F. Rodríguez, J.L. Guzmán. *Análisis de alternativas en la monitorización climática de edificios científicos – proyecto ARFRISOL*. Universidad de Almería, 2006.

Pearson, 1901. K. Pearson, On lines planes of closes fit to system of points in space, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 2 (1901) 559–572.

Perez y col., 1987. Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R., Menicucci, D., 1987. A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar Energy* 39, 221–231.

Pourgholi y Rostamian, 2010. Pourgholi, R., Rostamian M., 2010. A numerical technique for solving IHCPs using Tikhonov regularization method. *Applied Mathematical Modelling*, 34, 2102-2110.

Price y col., 2005. Price, K.V., Storn, R.M., Lampinen, J.A.: *Differential Evolution A Practical Approach to Global Optimization*. Natural Computing Series. Springer-Verlag, Berlin, Germany (2005).

Prívvara y col., 2011. Samuel Prívvara, Jan Šíroký, Lukáš Ferkl, Jiří Cigler, Model predictive control of a building heating system: The first experience, *Energy and Buildings*, Volume 43, Issues 2–3, February–March 2011, Pages 564-572, ISSN 0378-7788, 10.1016/j.enbuild.2010.10.022.

Psiloglou y col., 1997. Psiloglou, B.E., Balaras, C.A., Santamouris, M., Asimakopoulos, D.N., 1997. Calculation of apparent ground albedo for the estimation of global radiation on tilted surfaces, for four European locations. *International Journal of Solar Energy* 18 (4), 231–258.

Psiloglou y Kambezidis, 2009. Psiloglou, B.E., Kambezidis, H.D., 2009. Estimation of the ground albedo for the Athens Area, Greece. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 71, 943-954.

Porcar, 2008. Evaluación energética de edificios construidos: aplicación de metodologías de identificación de sistemas. Memoria de disertación para la obtención del grado de Doctor. Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, 2008.

Reindl, y col. 1990a. Reindl, D.T., Beckman, W.A. and Duffie, J.A., “Diffuse Fraction Correlations”, *Solar Energy*, Vol. 45, No. 1, (1990), pp.1-7.

Reindl y col., 1990b. Reindl, D.T., Beckman, W.A. and Duffie, J.A., “Evaluation of Hourly Tilted Surface Radiation Models”, *Solar Energy*, Vol. 45, No. 1, (1990), pp. 9-17.

Renaut y col., 2010. Renaut, R.A., Hnetynková, I., Mead, J., 2010. Regularization parameter estimation for large-scale Tikhonov regularization using a priori information. *Computational Statistics & Data Analysis*, 54, 3430-3445.

Reveliotis, 1997. <http://www2.isye.gatech.edu/~spyros/LP/LP.html>

Rezghi y Hosseini, 2009. Rezghi, M., Hosseini, S.M., 2009. A new variant of L-curve for Tikhonov regularization. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 231, 914-924

Rigollier y col., 2004. Rigollier, C., Lefèvre, M. and Wald, L., 2004. The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Solar Energy*. 77, 159-169.

Robertson, G.W., 1966. The light composition of solar and sky spectra available to plants. *Ecology* 47, 640–643.

Ronasi y col., 2011. Ronasi, H., Johansson, H., Larsson, F., 2011. A numerical framework for load identification and regularization with application to rolling disc problem. *Computers & Structures*, 89, 38-47.

Royer y col., 2010. Royer, P., Chazette, P., Lardier, M., Sauvage, L., 2010. Aerosol content survey by mini N2-Raman lidar: Application to local and long-range transport aerosols. *Atmospheric Environment*, In Press, Corrected Proof, Available online 12 November 2010.

Schaffrin y Snow, 2010. Schaffrin, B., Snow, K., 2010. Total Least-Squares regularization of Tykhonov type and an ancient racetrack in Corinth. *Linear Algebra and its Applications*, 432, 2061-2006.

Scharmer y Greif, 2000. Scharmer, K., Greif, J., 2000. *European Solar Radiation Atlas: fundamentals and maps*. Ecole des Mines de Paris, Paris.

Skarveit y Olseth, 1987. Skartveit, A. and Olseth, J. A., 1987. A model for the diffuse fraction of hourly global radiation. *Solar Energy*. 38, 271-274.

Song, J., 1998. Diurnal asymmetry in surface albedo. *Agricultural and Forest meteorology* 92 (3), 181–189.

Spencer, J.W., 1971. Fourier Series Representation of the position of the Sun, *Search*, Vol. 2, No. 5.

Stanhill y col., 1966. Stanhill, G., Hofstede, G.J., Kalma, J.D., 1966. Radiation balance of natural and agricultural vegetation. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society* 92, 128–140.

Sui y Cui, 2009. SUI, D., CUI, Z., 2009. Application of orthogonal experimental design and Tikhonov regularization method for the identification of parameters in the casting solidification process. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 22, 3-21. Tian, N., Sun, J., Xu, W., Lai, C.H., 2011. Estimation of unknown heat source function in inverse heat conduction problems using quantum-behaved particle swarm optimization. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 4110-4116.

Seem, 1987. Seem, J.E., "Modeling of Heat in Buildings," Ph. D. thesis, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin Madison (1987).

Stephenson y Mitalas, 1971. Stephenson, D.G. and Mitalas, G.P., "Calculation of Heat Conduction Transfer Functions for Multi-Layer Slabs," ASHRAE Annual Meeting, Washington, D.C., August 22-25, 1971.

Sommerville, 1995. I. Sommerville, *Software engineering* (5th ed.) Addison-Wesley Longman (1995).

Storn, R., Price, K.: Differential evolution – a simple and eient heuristic for global optimization over continuous spaces. *J. of Global Optimization* 11(4) (1997) 341–359.

Strachan y col., 2008. Strachan P and Vandaele L, *Outdoor Testing of Building Components: Case Studies*, Building and Environment, Vol 43 No 2 pp129-142, doi:10.1016/j.buildenv.2006.10.043, Feb 2008.

Task 8. <http://www.iea-shc.org/task08/publications/index.html>.

Task 22. <http://www.iea-shc.org/task22/>

TRNSYS, 1975. <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/index.html>.

Tikhonov, A. N., 1963. Resolution of ill-posed problems and the regularization method (in Russian), *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 151, 501–504.

Tarantola, A., 2005. Inverse Problem Theory and methods for Model Parameter Estimation. Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM).

Urbikain y col., 2012. M. Karmele Urbikain, Morris G. Davies, A Frequency Domain Estimation of Wall Conduction Transfer Function Coefficients, Energy and Buildings, Available online 17 May 2012, ISSN 0378-7788, 10.1016/j.enbuild.2012.05.005.

US-DOE, 1980. US Department of Commerce. DOE-2 manuals (Version 2.1) National Technical Information Service, Springfield, Illinois, USA (1980).

Visscher, 1999. Visscher G. J. W. (1999). "Humidity and Moisture Measurement". En Webster. (Ed). The measurement, instrumentation, and sensors handbook. CRC. pp. 72.1-72.13.

Voit y col., 1994. Voit, P., Th. Lechner, M. Schuler, "Common EC validation procedure for dynamic building simulation programs - application with TRNSYS", TRANSSOLAR GmbH, Conference of international simulation societies 94, Zürich.

Wang y Wnag, 2011. Wang, Q., Wang, H., 2011. A modified conjugate gradient method based on the Tikhonov system for computerized tomography (CT). ISA Transactions, 50, 256-261.

Wang, 1979. Wang F.S., "Mathematical modeling and computer simulation of insulation systems in below grade applications". ASHRAE/DOE Conference on Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings, Orlando, FL, 1979.

Wang y Xu, 2006. Shengwei Wang, Xinhua Xu, Simplified building model for transient thermal performance estimation using GA-based parameter identification, International Journal of Thermal Sciences, Volume 45, Issue 4, April 2006, Pages 419-432, ISSN 1290-0729, 10.1016/j.ijthermalsci.2005.06.009.

WEO, 2010. <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weo2010.pdf>

WMO, 1996. World Meteorological Organization. (1996). "Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation.WMO-Nº8". ISBN: 92-63-16008-2.

Winkelmann, 2002. F. Winkelmann, Underground surfaces: how to get a better underground surface heat transfer calculation in DOE-2.1E, Building Energy Simulation User News 23 (6) (2002) 19–26.

Yang, F., Fu, C., 2010a. A simplified Tikhonov regularization method for determining the heat source. Applied Mathematical Modelling, 34, 3286-3299.

Yang, F., Fu, C., 2010b. The method of simplified Tikhonov regularization for dealing with the inverse time-dependent heat source problem. Computers & Mathematics with Applications, 60, 1228-1236.